مهرجان القراءة للجميع
2000

امهات الكتب

البرت اينشتاين





الهيئة المصرية
العامة للكتاب

النسبية

النظرية الخاصة والعامة

تأليف : ألبرت أينشتين

تقديم : محمود أحمد الشربينى

ترجمة : د. رمسيس شحاته

مراجعة : د. محمد مرسى أحمد

إعداد وتحرير: د. سمير سرحان

د. محمد عنانى

على سبيل التقديم

«كتاب لكل مواطن ومكتبة لكل أسرة» تلك الصيحة التى أطلقتها المواطنة المصرية النبيلة «سوزان مبارك» فى مشروعها الرائع «مهرجان القراءة للجميع ومكتبة الأسرة» والذى فجر ينابيع الرغبة الجارفة للثقافة والمعرفة لشعب مصر الذى كانت الثقافة والابداع محور حياته منذ فجر التاريخ.

وفى مناسبة مرور عشر سنوات على انطلاق المشروع الثقافى الكبير وسبع سنوات من بدء مكتبة الأسرة التى أصدرت فى سنواتها الست السابقة «١٧٠٠» عنواناً فى حوالى «٣٠» مليون نسخة لاقت نجاحاً واقبالاً جماهيرياً منقطع النظير بمعدلات وصلت إلى «٣٠٠» ألف نسخة من بعض إصداراتها.

وتنطلق مكتبة الأسرة هذا العام إلى آفاق الموسوعات الكبرى فتبدأ بإصدار موسوعة «مصر القديمة» للعلامة الاثرى الكبير «سليم حسن» فى «١٦» جزءاً إلى جانب السلاسل الراسخة «الابداعية والفكرية والعلمية والروائع وامهات الكتب والدينية والشباب» لتحاول أن تحقق ذلك الحلم النبيل الذى تقوده السيدة: سوزان مبارك نحو مصر الأعظم والأجمل.

د. سمير سرحان

تصدير

إذا كان لنا أن نطلق صفة عامة على القرن العشرين لتمييزه عما سبقه من قرون ، مثلما نطلق عصر العلم على القرن السابع عشر فى أوروبا مثلاً ، فلن نجد خيراً من وصفه بأنه عصر « النسبية » إذ لم تكن نظرية النسبية التى وضعها ألبرت أينشتاين مجرد نظرية علمية تقتصر على التطبيقات المعروفة فى الفيزياء والرياضيات ، بل تعدت ذلك إلى مجال الفكر الإنسانى نفسه ، الذى أصبح ينفر من المطْلقات ويرى كل شىء تقريباً من وجهة النظر النسبية أى من حيث وضعها بالنسبة لبعضها البعض ، ولم يعد أحد من كبار مفكرى هذا العصر قادراً على القطع بشىء دون تحديد موقعه بالنسبة لغيره ، وانتقلت هذه النظرة من العلوم الطبيعية إلى العلوم الإنسانية ، فأصبحت تؤثر فى أحكامنا على الأشياء ، حتى كدنا أن نتحرز ونحن نطلق الأحكام المألوفة ، حتى ما يتعلق منها بالقيمة ، أى ما يسمى بأحكام القيمة ، وأحكام الجودة والصلاحية ، وأصبحنا نرى العالم فى ضوء ذلك التناسب الرائع بين كل ما فيه ، وقد كتب أحد العلماء فى عام ١٩٩٩ كتاباً يقول فيه إن التناسب المفترض فى الكون أصبح نفسه نسبياً ، أى إنه أصبح يخضع لقواعد نسبية لا يمكن القطع بشىء دون أخذها فى الحسبان ! .

ولم يكن ذلك العالم واسمه واتكن J. R. Watkin يشير إلى قيم أو إلى تقديرات بشرية تقبل الصحة والخطأ ، بل كان يتحدث عن نظريات علمية قائمة على أسس رياضية ، وكان اسم كتابه محيراً للقارىء فهو «نسبية النسبية» Relative Relativity (أو إن شئت «النسبية من منظور نسبى») وعلق الصحفى الذى عرض له فى مجلة أمريكية فى مطلع عام ٢٠٠٠ قائلاً : إن علماء القرن الحادى والعشرين لن يهدأ لهم بال حتى يعيدوا تفسير النسبية فيعيدوا رسم صورة الكون بل وصورة الإنسان نفسه! .

والغريب أن نظرية النسبية نفسها ظلت ردحاً طويلاً من الزمن مستعصية على الأفهام ومقصورة على العلماء المتخصصين ، ولم تفلح جهود الشارحين فى تقريبها من الأذهان ، حتى كتب أينشتاين نفسه هذا الكتاب الذى نقدمه اليوم للقارىء العربى ، واثقين من أنه سوف يعمل على إزالة بعض الغموض وإلقاء الضوء على هذه النظرية العلمية .

وتفخر مكتبة الأسرة بتقديم هذه الترجمة للكتاب ، فهو لاشك من أمهات كتب عصرنا (وأى عصر) ونأمل أن يجد فيه المتخصص بغيته، مثلما يجد القارىء غير المتخصص فيه مادة علمية يستطيع أن يقرأها على مهل ، وأن يجد فيها الإجابة على الكثير من الأسئلة التى تعن له فى هذا المجال .

والله ومن وراء القصد .

مكتبة الأسرة

مقدمة

بقلم/ د. محمود احمد الشربينى

ما قبل ظهور « النظرية النسبية »

حرصت أن أذكر كلمتى « النظرية النسبية » وألا أذكر كلمة «النسبية» بمفـردها ، فهمُ النظريـة النسـبية : الوصـول إلى قـوانين تفسـر الظواهر الطبـيعـية ، دون أن تتـشكل هذه القـوانين تبعـا لتغـير الزمـان والمكان والظروف والأحوال ، ولكن قد جرى على لسان القدماء كلمة « النسبية » قبل ظهور « النظرية النسبية » وأفاضوا فى الحديث عنها .

ولن أتوغل فى القدم ، بل أعود إلى بـضع مئات من السنين يوم أن كتب الفيلسوف « جون لوك » كتابه عن المعرفة الإنسانية ، فقد تحدث فيه عن الحركة النسبية ، وصورها لنا تصورا دقيقا ، وتحدث عن رقعة شطرنج وبيادق موضوعة عليها تركها ودعـا إليها ، وقال : إن البيادق لم تتحرك من مكانها رغم أن الرقعـة وما عليها كل فى مربعه قد انـتقلت من حجرة إلى أخرى ، ثم جعل الحجرة فى سفـينة ، وترك الرقعة حيث كانت فى موضعـها من الحجرة ، وعـاد إليها ووجدها فى نفس مكـانها ، وقال : إنها لم تتـحرك رغم أن السفينة كـانت تمخر عباب البـحر ، وحكم بأن السفينة فى مكانها لم تبرحه إذا ماحافظت على موقعها من جزيرة قريبة ، رغم علمه بأن الأرض قد دارت بعضا من دوراتهـا حتى عودته إلى السفينة وهى ساكنة .

نستنتج من كل هذا أن لابد أن قد غير كل من البيادق ورقعة الشطرنج والسفينة أماكنها بالنسبة لأجسام بعيدة عن الأرض . ولقد كان «نيوتن» على علم بهذه الحركات النسبية ، حتى إنه أعلن عام ١٦٨٧ ما سمى بمبدأ النسبة لـ« نيوتن » وهو ألاّ تغير فى حركة الأجسام بالنسبة لبعضها مع بعض فى مجال ما إذا تحرك هذا المجال الذى يحوى الأجسام حركة منتظمة مستقيمة بعد أن كان ساكنا ، فحركة الأشخاص فى القطار لا علاقة لها أبدا بالقطار ساكنا أو متحركا حركة منتظمة ، والقوانين التى تحكم حركة الأشخاص فى قطار منتظم الحركة هى نفس القوانين التى تحكم الأشخاص فى المحطة ، ولو جاز أن نضع هذا المبدأ فى فى صيغة - ربما نعود إليها عند التحدث عن النظرية النسبية - لقلنا لا تتشكل القوانين التى تفسر الظواهر الميكانيكية تبعا لتغير منتظم للمكان ، فما طبق على مكان من قوانين ميكانيكية يطبق أيضا بنفس شكله على مكان آخر يتحرك حركة منتظمة بالنسبة للمكان الأول .

ويجمل بى أن أشير إلى ما قلته سابقا من أن النظرية النسبية تبحث عن قوانين تفسر الظواهر الطبيعية ميكانيكية أو غير ميكانيكية ، ولا تتأثر بالزمان والمكان والظروف والأحوال . وتبين أهمية مبدأ النسبية لـ« نيوتن» فى تعميم القوانين الميكانيكية ، فهى لا تسرى على منطقة بذاتها فقط ، بل تسرى على مناطق أخرى فى حركة منتظمة بالنسبة لبعضها مع بعض. وهكذا كان « نيوتن » ينظر إلى الأرض ويمتد نظره إلى السماء ويسيطر

بقانونه على الأرض والسماء ، وخلقه فى هذا الخلق العالم الحق :

سقطت تفاحة على رأسه فى الأرض ، وأسقطتها قوة متبادلة بين الأرض ، والتفاحة وكبرت التفاحة فى نظره ، ورآها بعين الخيال ؛ خيال العالم البحاثة رآها فى كبد السماء وكأنها الشمس ، ولم لا تكون الشمس ذاتها ، وتكون هناك قوة متبادلة بين الشمس والأرض ، قوة تتبع قانونا هو القانون الذى تتبعه القوة بين التفاحة والأرض ، لو عرضنا بين المسافات بالمسافات وبين الكتل بالكتل ؟

وهكذا خرج « نيوتن » بقانون الجاذبية الأرضية ، وعممه على الكواكب فى مداراتها ، والشموس فى أفلاكها ، وهذه هى قدرة العالم الملهم ؛ إذا أخرج إلى الوجود قانونا سعى جاهدا إلى تعميمه فما باله وهو يشاهد الحركة تسيطر على الوجود فيرى الأرض فى حركة حول نفسها وحول غيرها ، ويرى الكواكب والشمس والعمر وغيرها من شموس وأقمار ومجرات « كل يجرى لمستقر له » ؟

كلها حركات نسبية إذا وصفت حركة جرم لا بد أن تصفه بالمقارنة ، فتصف حركة جسم بالنسبة لجسم آخر متحرك ؛ فهل لا يوجد فى مكان فى هذا العالم الإلهى الكبير نجم ساكن سكونا مطلقا ، وخطورة هذا الكشف أن كل ماينسب إلى المطلق فهو مطلق .

فإذا عثرنا على هذا النجم أمكننا أن نصل إلى الحركة المطلقة فكل

حركة بالنسبة لهذا النجم حركة مطلقة ، وكان هذا النجم هو الضالة المنشودة لعلماء القرنين الماضيين ؛ تخيلوا وتخيل معهم « نيوتن » أن هذا النجم كالعنقاء يستحيل العثور عليه ، واقتراح « نيوتن » بديلا عنه الفضاء المحيط تسبح فيه الكواكب بما فيها من كائنات أحياء وأموات .

فالفضاء فى نظره ساكن سكونا أبديا ، فهو المربط الذى يرجع إليه إذا أردت أن تعرف الحركة المطلقة ، وكل ما انسب إليه فهو مطلق . وزاد هذا التفكير رسوخا أن أمواج الضوء تأتى إلينا عبر الفضاء الخالى ، ولا بد أن تأتى إلينا محمولة فى بحر من الأثير تخيله العلماء لتفسير ظاهرة انتقال الضوء ، وزاد إيمان علماء القرنين الماضيين بالأثير أن للكهرباء والمغناطيسية القدرة على التأثير من بعيد ، فلا بد أن تكون هناك أيدٍ خفيةٌ، تمتد لتحدث الأثر ، تمتد فى وسط يحملها . ولا أحب أن أورد قول بعض الفلاسفة فى هذا المضمار ، وأظنه « ديكارت » الذى قال : إن مجرد الوجود وجود جسيمين مفصول أحدهما عن الآخر ؛ برهان على وجود وسط بينهما ، ولكنى أحب أن أورد بعض التجارب التى عملت للتحقق من صحة فرض وجود الأثير .

ولقد بنيت أهمُّ تجربة على أن لا بدَّ أن تخوض الأرض أثناء دورانها فى الأثير الساكن ، وكان أن وفق « مايكلسن » فى عمل جهاز لقياس التغير الذى يطرأ على سرعة الضوء متحركا فى اتجاه حركة الأرض ، ثم متعامدا على اتجاه حركتها ، ولعل الفكرة قد خطرت له وهو يتخيل بحر

الأثير بحر ماء ، وأن الزمن الذى يأخذه سابح ليقطع مسافة معينة ، سابحا على طول التيار ذهابا وإيابا غير الزمن الذى يأخذه السابح ونفسه ليقطع المسافة نفسها عبر التيار ذهابا وإيابا ، ومعنى هذا أن سرعة السابح على طول التيار غير سرعته عبر التيار ويمكن من هذا معرفة سرعة التيار بالنسبة للأرض ، وهى تساوى فى المقدار وتخالف فى الاتجاه سرعة الأرض بالنسبة للتيار .

لذا جعل « **مايكلسن** » الضوء يخترق التيار الأثيرى طولا ، ثم جعله فى الوقت نفسه يخترقه عرضا ، مع تساوى الطول والعرض من الوجهة المترية . ونظر أيهما يسبق الآخر بعد أن يقطع المسافة ذهابا وإيابا .

لم ينفرد « مايكلسن » بهذه التجربة ، بل اشترك معه « مورلى » سنة ١٨٨٧ ؛ وعرفت التجربة فيما بعد بـ« تجربة مايكلسن و مورلى » ، وأساس التجربة إرسال حزمة ضوء من لون واحد ، ثم وضع لوح نصف شفاف فى طريق الحزمة ليقسم الحزمة جزءين؛ حزمة جزئية تتجه غرباً أعني علي امتداد الحزمةالأصلية، وحزمة جزئية أخري تتجه شمالا أعنى على امتداد متعامد للحزمة الأصلية ، تنعكس كل حزمة جزئية على نفسها بسقوطها على مرآة على مسافة متساوية من اللوح غربا وشمالا .

وللوح وظيفتان: الوظيفة الأولى عرفناها وهى تجزئة الجزمة إلى

جزءين غربا وشمالا ، والوظيفة الثانية لجميع الجزءين بعد انعكاسهما فى حزمة واحدة تتجه جنوبا .

وتظهر نتيجة التجربة من رؤية ما يحدث فى « تلسكوب » موضوع فى الطريق جنوبا ، وجدا أن الحزمة الساقطة على اللوح .

وقد انقسمت إلى حزمتين تركتا اللوح فى وقت واحد ، وعادتا إليه فى وقت واحد ، واجتمعتا فى حزمة واحدة فى وقت واحد ، وبذلك عجز « مايلكسن » و « مورلى » عن الكشف عن أى اختلاف فى سرعة الضوء نتيجة لاختلاف سرعة الأرض فى الأثير .

لم يقنعا بتجربة واحدة لغرابة النتيجة التى حصلا عليها ومخالفتها للمألوف ، فالمألوف أنك أسرع فى الإمساك بكرة مقذوفة إليك لو جريت نحوها للإمساك بها ، لم يقنعا بتجربة واحدة ، وهذا حرص معروف عن العلماء ، فأعادا التجربة فى الربيع والخريف أعنى بفارق زمن مقداره ستة أشهر، واختارا أكثر من وضع للجهاز ، ورغم كل هذا الحرص وصلا إلى النتيجة غير المنتظرة : أن لا اختلاف فى سرعة الضوء سواء اقترب منك أو ابتعد عنك، أو أقتربت أنت منه أو ابتعدت عنه .

إذن فالقول بأننا نتحرك فى أثير ساكن قول كانت تعوزه التجربة ، ومعنى هذا أن هناك شكا فى وجود مربط تبدأ منه القياسات ، فالقياسات المطلقة مشكوك فى وجودها ، وهذا لا يتفق ومزاج علماء القرنين

الماضيين، فخير أن تقف الأرض عن دورانها من أن ينكر وجود الأثير .

ثم كان من أراد أن ينقذ الموقف حرصا على سلامة العلم فى ذاك الوقت ، فنادى العالم الأيرلندى « فيتز جرالد » عام ١٨٩٢ بانكماش الأطوال فى اتجاه حركة الجسم وبقائها كما هى فى اتجاه متعامد على الحركة، وبذلك رأى أن عجز التجارب هو فى الواقع إثبات لاختلاف السرعة سرعة الضوء ، والمسئول عن عدم ظهورها هو الانكماش المفروض، فأرضى كبرياء العلماء بتمسكه بالأثير ، وتمسكه باختلاف سرعة الضوء باختلاف الحركة ، وأعلن تآمر الطبيعة على إخفاء الاختلاف.

وكانت الصيحة التى وضعت الأمور فى مواضعها صيحة « ألبرت أينشتين » عام ١٩٠٥ ، وقبل أن أبدأ بذكر طريقة معالجته لهذه الأمور وكيف قاد سفينة العلم إلى حيث يجب أن تقاد ، فأحدث ثورة علمية فسلفية اجتماعية - أتحدث عمن هو « أينشتين » .

أينشتين :

رأيت « ألبرت أينشتين » فى لندن عام ١٩٣٣ ، رأيته رؤيا العين ، وتنبئ النظرة العابرة إليه بأنه رجل ثائر ، فشعره ثائر على رأسه وملابسه ثائرة على جسمه ، والكلمات الإنجليزية تخرج من فمه كلمة إثر كلمة فى صعوبة ، وكأنَّ لسانه يبذل مجهوداً فوق الطاقة ، يقذف الكلمة قوية

متكسرة بين الحين والحين ، وتشعر أنه لن يستطيع أن يتم محاضرته ، وإذا به يقولها بتمامها دون أن ينقص منها شيئاً ، ولم أعد أذكر من محاضرته غير نصيحة واحدة بوجوب العكوف على البحث العلمى والإخلاص له مع اختيار أحسن الوظائف ملاءمة كمرتزق للعالم ، واقتراح وظيفة حارس لفنار فى وسط البحر . . كان غريباً أن أسمع هذا من صاحب « النظرية النسبية الخاصة » وصاحب « النظرية النسبية العامة »، وصاحب البحوث العدة فى : الحركة البرونية ، والديناميكا والإحصائية والميكانيكا الموجبة ، والكهرباء الضوئية ، والحرارة النوعية .

إنى أعلم أنه لم يكن حارس فنار ، بل إن الحياة كانت قاسية عليه، ومن يدرى لعله وهو قريب من الحياة بعيد عنها ، ولعله يعانى من الواحدة النفسية ما يعانى ، لكن غاظنى أنى دفعت مالا لحضور هذه المحاضرة، واشتدّ غيظى من رصد هذا المال لغير العلم ، وما كنت أظن أن عالما عالميا ينادى بالنسك العلمى ، يجمع المال لغير العلم؛ وكان أن أردت أن أرجع الأمور إلى أصولها فاستقصيت تاريخ حياته .

فإذا به قد ولد فى ١٤ من مارس سنة ١٨٧٩ فى مدينة « أولم » من جنوب ألمانيا من أسرة يهودية غير مستقرة ، انتقلت بعد عام من ميلاد الطفل إلى ضاحية من ضواحى « ميونخ » وكان أبوه يملك مصنعا كيميائيا كهربيا صغيرا ، وساعد الأب فى إدارة المصنع أخ له مهندس وهو عم الطفل ، وكانت هواية أم الطفل الموسيقى ولا سيما موسيقى «بيتهوفن» .

فكان من الطبيعي أن تجبره أمه على تلقى دروس على الكمان وهو فى السادسة من عمره ، وكان أن أقبل على هذه الدروس كارها ، ثم روض نفسه على مايكره حتى انقلبت الكراهية حبا فأصبح يحب الموسيقى، بل كان يفزع إليها طوال أيام حياته ، لتهدئ من نفسه وتسبغ عليه نعمة الرضا والطمأنينة وراحة البال بعد عناء العمل ، وكان الأثير عنده من الفنانين « موزارت » .

وكأن الله أراد له أن يتأمل قبل أن ينطق ، وأن يختزن فى الوعى قبل أن يفيض فى الحديث ، فعجز عن أن يفصح عما فى نفسه حتى موعد متأخر عن أترابه من الأطفال . فتأخر فى النطق حتى ظُن به الشذوذ ، وخُشى عليه من البله ، وقد أنف أن يشارك زملاءه ألعابهم ، وانطوى على نفسه ينعم بأحلام اليقظة ، وينأى عن أى مجهود عضلى ولو كان لعبا للتسلية ، وبان امتعاضه وعدم استساغته لما يتذوق الطفل العادى من مناظر مثيرة ، فقد كان يتألم عند ما يرى التدريبات والاستعراضات العسكرية وما أكثرها وقتذاك فى شوارع «ميونخ» وما كان يحتمل أن يرى الإنسان يتصرف ولو فى مشيته تصرفا آلياً كالآلة الميكانيكية الصماء .

ثم دخل «أينشتين» الطفل المدرسة ، وكانت مدرسة أولية كاثوليكية، فقد كانت المدارس فى «ميونخ» تحت إشراف هيئات دينية ، ولم تهتم أسرة «أينشتين» كثيراً بالدين، فلم تجد الأسرة غرابة وهى اليهودية دينا أن يكون إبنها كاثوليكيا تعليما .

وانتهى « أينشتين » من دراستة الأولية والتحق بمدرسة ثانوية وهو فى العاشـرة من عمـره ، ودرس فى هذه المدرسة تعـاليم الديانة اليـهودية ، وتفاعلـت تعاليم اليهـود مع تعالم الكاثولـيك التى سبق أن تعلمـها فى المدرسة الأولية ، وأخرجت منه شـابا ملحدا لا يدين بدين ، ويشعر بأن الأديان معوّقات تعـوق التفكير الحر الطليق ، وكفر بالقـيم الروحية التى جاءت بها الأديان ، والإنسـان لا يفيق إلى دينه حتى تأتيـه القارعة وإلا استبق الحـوادث . وأقول قد جاءته القارعـة على يد « هتلر » عام ١٩٣٣ فاذا بـ « أينشتين » العالم يعود يهوديا متعصبا لليهود ، ولكنى أفضل أن أسـاير الحـــوادث خطوة خطوة ، وأعـود إلى المدارس الـثـانوية ، وأرى الطالب « أينشـتين » يخطو خطوات بطيئـة فى دراستـة ، فقد كـان يكره استذكار الدروس عن ظهر قلب دون فهم أو تفهم .

ويجمل أن أذكر الأثر الذى تركه عمُّه فى نفسه وفى مستقبل حياته ، فقد حبب إليه دراسة الرياضيـات وكانت لعمه طريقة ، طريفة فى تقريب العلم إلى ابن أخيه ، فكان يتحدث عن الجـبر بأنه العلم الذى يقلل كمية العمل المطلـوب لحل مسألة من المسـائل ، ولقد فرح ابـن الأخ بهذ العلم واعتبره علما لـلتسلية، كأن تخرج لصيد حيـوان مجهول « س » حتى إذا وقع فى الفخ عرفت ما هو « س » .

ثم ملك عليه تفكيـره علم الهندسة ، وشعر بأنه العلـم الذى يرغبه ويريده ، فـأخذ بلبه الـتسلسل فى المنطق والدقـة فى التعـبيـر والوصول بمعطيات معلومة إلى الهدف المجهول وهو البرهان المطلوب .

وكثيرا مـا كان يذكر بدء دراسته لهندسة « إقـيليدس » كأهم أثر مر عليه في شبابه وفي عامه الثـاني عشر علي وجه التحديد ، بل ذهب إلي أبعد من ذلك بأن تنبـأ بفشل الباحث النظرى الذى لم يشعـر فى شبابه بأهمية هندسة « إقيليدس » وقدر مـا كان « أينشتين » مميزا فى الرياضيات قدر ما كان متأخرا في العلوم التى تعتمد في دراستها على الاستذكار ، ثم زاد الطين بلة أن شـعر أساتذتـه في المدرسة الثانـوية بعدم توقيـره إياهم وخضـوعه لهم خـضوعا تامـا ، مما أدّى إلي فصله من المدرسـة ، فصل وذهب ليلحق بأبيه فى « إيطاليا » فقـد اضطر أبوه قبل فصله بعام إلى أن يصفى أعـماله فى « ميونخ » ويرحل إلى « مـيلانو » ليبدأ عـملا جديدا تاركا ابنه وهو فى الخـامسة عـشرة من عمره فى « مـيونخ » ليتم دراسته الثانوية ، وكان أن فصل وذهب إلى « ميلانو » .

ثم أخذ يفكر فى مستقبل حـياته وهو يرى أسرته وما وصلت إليه ، واستـقر رأية على أن يتـخذ من التدريس مـهنة له ، قرر أن يؤهل نفـسه ليكون مدرسا فى الطبيعة النظرية ، واعتزم أن يلحق بمدرسة «البوليتكنيك الفيدراليـة» السويسرية الشهـيرة بـ« زيورخ » وتقدم إلـى الامتـحان وخانه الحظ .

وقد استرعت أوراق إجاباته اهتمام مدير « البوليتكنيك » إذ بانت له القدرة الفائقة فى الرياضيات والضعف الواضح فى اللغات وعلوم الحياة .

فتطوع ليـساعده وأدخله مـدرسة توطئة لقـبوله فى « البـوليتكنيك »

وكانـت المدرسة على غـير غـرار مدرسة « مـيونخ » فـقد تركت الحـرية للطلاب فى أن يفكروا بأنفـسـهم ، ولا يعتمدوا على الاسـتـذكار ، وكان أيضا على اتصال مـباشر بالمدرسين يناقشونه ويمـحضونه النصح ، وهناك شعـر « أينشتين » بحـياة أفـضل تتفق ومـيوله ، وكان أن نجـح والتحق بمدرسة « البوليتكنيك الفيدرالية» بـ« زيورخ » .

والدراسة تحتاج إلى مال وقد عجز أبوه عن القيام بأى مساعدة مالية، ولكنه حصل على المال من قريب له ، وأخذ يؤهل نفسه لمهنة التدريس ، فاكتسب الجنسية السويسـرية ، وأصبح مواطنا سويسريا حتي لا تمتنع عليه الوظيفة المرجـوة ، وهو الرجل الممتاز ، والحاصل على خـطابات توصية من أساتذته تشـهد بأنه شخص مـن الطراز الأول ، ورغم كل هذا عزّت عليه الوظيـفة ، وقبل وظيـفة فاحص فى مكتب للتـسجيل سـويسرى فى «برن» وكان ذلك عام ١٩٠٢ ، ولـم تمنعه مـهام الوظيفة من أن ينظر فى العلم ويبـحث عن المجهول ، فنـال شهادة الدكـتوراه عـام ١٩٠٥ ، وقد كانت هذه السنة خصبة أنتة فيها « النظرية النسبية الخاصة» وأبحاثا أخرى عن الحركة البرونية ، والديناميكا الإحـصائية ، الكهرباء الضوئية ، وبدأ يحتل مكانا مكينا بين العـلماء ، تهافتت عليـه الجامعات تطلبـه أستاذا، فكان أستـاذا فوق العادة فى جـامعة « زيورخ » عام ١٩٠٩ ثم أسـتاذا ذا كرسى فى جـامعة « براج » عام ١٩١١ واسـتعادتة جامعـة «زيورخ» مرة أخرة ليشغل كرسى الأستاذية فى « البوليتكنيك » حيث كان طالبا وذلك

عام ١٩١٢ ، وحظيت به من بعد ذلك « برلين » أستاذا متفرغا للأبحاث ١٩١٤ ، فأصبح أستاذا فى « معهد القيصر ولهلم » وعضوا فى الأكاديمية الملكيــة البروسـية ، ولم يمض على تعـينه عام واحـد حتى أذهل العـالم بـ«النظرية النسبية العامة» عام ١٩١٥ وكـان للعالم عليه حق، فقام بجولة علمية لإلقاء محاظرات فى « إنجلـترا » و «الولايات المتحدة الأمريكية» ثم جرى عليه ماجرى على يهود ألمانيـا ١٩٣٣ ، فتحركت فيه النوازع الدينية الكامنة، فأصبح عضوا للحركة اليهودية ، وإن نادى بوجوب قيام حكومة عالمية، واعتذر عن أن يكون رئيسا لـ«دولة إسرائيل» المزعومة، معلنا عجزه عن معالجة الطبائع البشرية ، وإن نجح فى معالجة المسائل الطبيعية .

وقد احتـضنته « الولايات المتحدة الأمـريكية » وعينته مـديرا لمدرسة الرياضيــات فى معهد الدراســات العليا فى « برنستين نيوجـرسى » حيث أرسل خطابا إلى الرئـيس « فرانـكلين روزفلت » فى خـريف سنة ١٩٣٩ ينبئه بإمكانية عمل قنبلة يدخل فى تكوينها « اليورانيوم » ولها فاعلية قوية فى الهدم والتدمـير ، ثم ندم على مافعل ، وذلك بعـد أن ألقيت القنبلة الذرية على « هيروشيما » فى ٦ من أغسطس سنة ١٩٤٥ .

وقد قدّره العلم والعلماء ، إذ منح عام ١٩٢١ جائزة « نوبل» لأعماله فى «الفوتونات» والنظرية الكمّية ، وقد حاول أن يذيب القوانين فى قانون واحـد بأن نشـر سنة ١٩٥٠ مـحاولة لذلك ، وسـمـاها «نظرية المجـال الموحد» ، ومات فى ١٨ من أبريل سنة ١٩٥٥ .

ويجمل بى قبل أن أختتم الحديث عنه أن أذكر موقفا له يدل على الدقة وبعد النظر ، مما قد يفوت أساتذته ومعاصريه من العلماء المشهود لهم .

وسأذكر من معاصرية « لورنتز الهولندى » وقد اقترن اسمه باسم «فيتزجيرالد» الذى نادى بانكماش الأجسام فى اتجاه حركتها ، وأنه كلما ازدادت سرعة الأجسام ازداد انكماشها ، وكلما قلت سرعة الأجسام قل انكماشها . وأمكنه بذلك تفسير تجربة « مايكلسن » و « مورلى » وإثبات أن ما تراءى لهما فى التجربة من عدم وجود اختلاف فى سرعة الضوء فى اتجاه حركة الأرض عن سرعته فى اتجاه متعامد لحركتها ليس بصحيح ، الواقع أن هناك فرقا ، وأن الانكماس المذكور أخفى هذا الفرق، ويصل الضوء المتعامد والضوء غير المتعامد فى وقت واحد .

ثم اقترح « لورنتز » عام ١٨٩٥ ، أن الانكماش لا يجرى على الجسم ككل ولكنه يجرى على مكونات هذا الجسم من « إلكترونات » أثناء حركتها فى الأثير مع الجسم مما ينتج عنه تعديل فى القوى الرابطة بين الذرات والجزئيات لجسم يتحرك فيحدث تقارب بينها بقدر يتفق ، وما قدره « فيتزجيرالد» وكان أن فسَّر تجربة « مايكلسن » و « مورلى » وسمّى الانكماش انكماش « لوريـنتز فيتزجيرالد » أن كلا منهما كان على غير علم بما عمل الآخر ، ويعتبر رأى « لوريـنتز » هو الأساس ، إذ يبدأ بـ«الإلكترون» ورأى « فيتزجيرالد » نتيجة حتمية له .

ولعل رأى « لورينتز » وإن اتحدت نتيجته مع « فيتزجيرالد » هو أقرب إلى المنطق العملى ، إذ سبق أن بين فى عام ١٨٨٢ العالم «ج.ج طومسن» أن الجسم المكهرب تزداد كتلته لو تحرك ، وسميت زيادة الكتلة بأنها كتلة « إلكترومغناطيسية » ، ومعنى هذا أن الحركة تؤثر فى الجسم المكهرب ؛ استنبط « طومسن » ذلك بمناقشة معادلات لـ « ماكسويل » إذ تبين هذه المعادلات العلاقة بين الآثار الكهربائية والآثار المغناطيسية أثناء تغيرها فى الأثير ، وقد بان من هذه المعادلات :

أن الآثار تنتقل بسرعة ثابتة قدر سرعة الضوء ، حتى ذهب «ماكسويل» إلى أن الضوء أمواج « إلكترومغناطيسية » وقد أثبتت التجربة فيما بعد كل ما ذهب إليه « ماكسويل » وأصبحت معادلاته هى حجر الزاوية فى جميع الاتصالات اللاسلكية ، وحجر الزاوية فى جميع الأبحاث الخاصة بحركة « الإلكترونات » حتى أن «لورينتز» استخدم هذه المعادلات في المقارنة بين «إلكترون» متحرك فى الأثير بسرعة كبيرة و « إلكترون » ساكن فى الأثير قصد جعل المعادلات الخاصة بالجسم المتحرك تتفق شكلا والمعادلات الخاصة بالجسم الثابت ، ورغم الاتفاق الشكلى فهناك علاقات بين أمكنة وأزمنة الجسم المتحرك ، وأمكنة وأزمنة الجسم الساكن ، وتسمى هذه العلاقات بتحويلات «لورينتز».

نظر « أينشتين » إلى المعادلات السابقة الخاصة بالجسم المتحرك والجسم الثاتب كما كتبها « لورينتز » ونفذ بثاقب فكره وبعد نظره إلى

مـرامى هذه المعادلات ، وكـانت المرامى أبعـد من أن يصل إليـها عـالم معاصر له ، واسـتشف منها أنها تحمل فى طياتها أسـباب الاستغناء عن الأثير ، وإمكان التقـدم العلمى دون الاحتياج إلى فـرض وجود الأثير إذ ثبت الجسم المتحرك ، وحرك الجسم الثابت ، ووصل إلى نفس النتائج. ومعنى هذا أن المعادلات خلو من أى دليل يثبت أى الجسمين هو المتحرك وأيهما هو الثابت ، إذن يمكن اعتبار سرعـة الجسم المتحرك بالنسبة للأثير الثابت، كسرعة الجسم المتحرك بالنسبة للجسم الثابت ، وبهذا كان فرض وجود الأثير كعدمه .

النظرية النسبية الخاصة

ثم جاء دور « أينشـتين » وهو فى السادس والعـشرين من عـمره ، ويعمل فى مكتب لـلتسجيل بـ« برن » ليبدى رأيه فى « تجـربة مايكلسن ومورلـى » تلك التجـربة التى أدهشت العلماء وجـعلت « فـيتزجـرالد » و«لورينتز» يعلنان تآمـر الطبيعة فـى عدم كشفهـا اختلاف سرعـة الضوء استقبلته مدبرا أو غير مدبر .

هذه التجربة التى قصد بها إثبـات وجود الأثير وإثبات وجود السرعة المطلقـة ينظر إليها « أيـنشتين » نظرة أخرى ، ويخـرج بعد مناقـشتـها ومناقشة معادلات « ماكسويل » كمـا طبقها « لوريتز » على جسم متحرك وجسم ثابت ؛ يخرج بأسـس « النظرية النسبيـة الخاصة » وسميت خاصة

لأنها تتعلق بالقوانين الطبيعية المطبقة فى مناطق تتحرك بحركات منتظمة، فخصصت الحركات بالانتظام ، أو قيدت بالانتظام ، لذا تسمى أحيانا بـ « النظرية النسبية المقيدة» ، ويمكن وضع هذه الأسس تحت مبدأين هامين:

الأول - لا وجود للحركة المطلقة من الوجهة الطبيعية ، ومعنى هذا أنه لا يمكن بوسائلنا الطبيعية الكشف عن وجودها .

الثانى - سرعة الضوء مقدار ثابت لا يتأثر بحركة المصدر أو حركة الراصد ، مهما كان الاتجاه ، ومهما كانت الأوضاع ، ومعنى هذا أن سرعة الضوء هى المعيار الوحيد المطلق ، ومقداره فى أى منطقة هو نفس المقدار ، سواء كانت المنطقة متحركة أو ساكنة معتدلة أو مائلة .

وقد أنكر « أينشتين » بالمبدأ الأول وجود الأثير ، وبالتالى أنكر وجود مربط ثابت تنسب إليه الحركة التى يتميز بعضها بكونه مطلقا وبعضها الآخر بكونه نسبيا .

وأنكر أيضا بالمبدأ الثانى تآمر الطبيعة على القوانين الطبيعية ، حتى لا يكشف عن اختلاف فيها حسب الحركة . وذهب إلى أن « تجربة مايكلسن و مورلى » صريحة مكشوفة لا خفاء فيها ولا غموض ، وأن سرعة الضوء واحدة فى اتجاه حركة الأرض أو فى اتجاه متعامد على هذه الحركة جاء الضوء من الشمس مباشرة ، أو منعساً من القمر ، أو من أى كوكب، أو نجم ثابت أو متحرك .

ثم أنتهى إلى أن القوانين الطبيعية يجب أن تكون هى بعينها أو بشكلها فى أى منطقة من المناطق المتحركة بحركة منتظمة ، وهذا يبين الفرق بين « نسبية نيوتن » و « نسبية أينشتين » فقد قصد « نيوتن » عدم تغير القوانين الميكانيكية فى أى منطقة عن الأخرى ، وقصد « أينشتين » عدم تغير القوانين الطبيعية إطلاقاً ، ميكانيكية أو ضوئية أو كهربائية أو مغناطيسية ، ومنها معادلات « ماكسويل » حيث تظهر سرعة الضوء ثابتة مع تغير الزمان والمكان . وثبات سرعة الضوء له أهميته ، إذ هو لغة التفاهم بين بعض المناطق وبعضها ، إذ يجب أن يراعى ثبات سرعة الضوء إذا ما أردنا أن ننتقل من منطقة إلى منطقة ، أو أن نجعل قوانين منطقة مّا لأصحابها كقوانين منطقة أخرى لأصحابها الآخرين ، فهناك معادلات تحويل مقيدة بهذا الشرط، ومن العجب أن وجدت المعادلات الجديدة تحت الشرط الجديد هى نفس معادلات التحويل لـ«لورينتز» وهى معادلات تبين العلاقة بين المكان الخاص والزمان ، والمكان غير الخاص، وكذلك بين الزمن الخاص والمكان والزمان غير الخاصين .

ويجمل أن أذكر أن لا فارق بين « نسبية نيوتن » و « نسبية أينشتين» للقوانين الميكانيكية إذا كانت السرعات أقل بكثير من سرعة الضوء ، أما إذا قاربت سرعة الضوء فيخلو الميدان لـ« نسبية أينشتين » دون منازع .

وإذا نظرنا إلى معادلات التحويل التى تجعلنا نحكم على ما يحدث فى منطقة أخرى نرَ أن ما يراه أصحاب المنطقة الأخرى طولا معيناً نراه

نحن طولا أقصر ، إذ انكمش نتيجة للحركة المنتظمة للمنطقة وما عليها .

وكذلك نحكم على أن ما يراه أصحاب المنطقة الأخرى حادثاً فى فترة من الزمن معينة نراه نحن حادثاً فى فترة أطول، وكذلك نحكم على ما يراه أصحاب المنطقة الأخرى كتلة معينة نراه نحن كتلة أكبر نتيجة للحركة المنتظمة للمنطقة ، ولو سألنا المنطقة الأخرى عن رأيها فينا لقالت: إن أطوالنا تقصر فى اتجاه حركتها بالنسبة لهم ، وأزماننا تطول والكتل تزيد .

وما من تجربة طبيعية تمكننا أن نحكم أيهما الصحيح ، وذلك لأن المقياس الوحيد وهو سرعة الضوء واحد فى كل المناطق ، وقد فقدنا بذلك الإحساس بالمقاييس المطلقة ، وتعاملنا بالمقاييس النسبية مع سيادة القوانين المحلية فى كل منطقة وكل القوانين متشابهة .

ونظرة أخرى إلى قوانين التحويل نجد بها أن المكان لمنطقة يحدد بمعادلة فيها المكان والزمان للمنطقة الأخرى ، ونجد أن الزمان يحدد بمعادلة فيها الزمان والمكان للمنطقة الأخرى ، إذن اندمج الزمان فى المكان وأصبح لا وجود لزمان مستقل عن المكان ، ولا وجود لمكان مستقل عن الزمان ، فلا زمان مطلق ولا مكان مطلق ، وللتقريب إلى الذهن فقط أقول : فى الوقت الذى فيه صباح فى القاهرة يكون مساء فى منطقة

أخرى ، ولكن المسألة أعمق من هذا فربما نجد حادثة فى منطقة تحدث أبداً فى وقت واحد لا تحدث أبداً فى وقت واحد فى غير هذه المنطقة من مناطق متحركة بحركة منتظمة بالنسبة للمنطقة الأولى ، وسألجأ إلى الفكر دون التجربة لبيان ذلك .

افرض أنه قد أنيرت « مدينة المقطم » فى الوقت الذى أنيرت فيه «أهرام الجيزة» وهكذا حكم رجل ينظر إليهما من « برج القاهرة » ، فقد وصل الضوء إلى عينيه من المكانين فى وقت واحد وهو فى منتصف المسافة ، ولنفرض أنه فى هذا الوقت بالذات وقت أن رأى رجل البرج تزامن الإنارتين كانت تحلق فوق رأسه طائرة ، ولنفرض جدلا أنها تتجه من « الأهرام » إلى « مدينة المقطم » بسرعة أكبر من سرعة الضوء ، وهذا مستحيل من الوجهة العملية ، إذ أن سرعة الضوء تعتبر سرعة لايصح أن يصل إليها جسم مادى أبداً ، إذ لو كان هناك جسم له سرعة الضوء لازدادت كتلته حتى وصلت إلى مالا نهاية .

نعود ونقول : إن رجل الطائرة يجزم لنا وهو صادق أن مدينة «المقطم» هى المنارة فقط ، وأن « الأهرام » غير منارة ، إذ يعجز الضوء الصادر عن « الأهرام » عن أن يصل إليه وهو يطير عنه بسرعة أكبر من سرعته ، إذن لا تزامن فهناك إنارة فى « المقطم » ولا إنارة فى «الأهرام» ولو انخفضت سرعة الطائرة إلى سرعة أقل قليلا من سرعة الضوء لرأى « المقطم » ينار أولا ثم « الأهرام » ثانياً فلا تزامن .

فترى منطقة تزامناً وغيرها لا يرى تزامناً ، فالزمن كالمكان نسبى غير مطلق ، بل إذا نظرت إلى النجوم واخترت نجماً على مسافة يقطعها ضوؤه فى شهر من الزمان ، فالضوء الصادر من النجم من شهر مضى هو الضوء الواصل إلى عينيك الآن ، وربما يكون النجم قد انفجر ، وأصبح لا وجود له بعد أسبوع من إرساله الضوء الذى وصل إلى عينيك ، ولن نرَى الانفجار إلا بعد سبعة أيام مقبلة ، فأنت ترَى الآن ماضىَ النجم ، وحاضرُه ستراه فى المستقبل ، وربما يرى مستقبله شخص فى مكان آخر.

وقد بين « أينشتين » العلاقة بين الكتلة والطاقة وقدرها تقديراً ، ولعلنا لو بحثنا مكوّنات الذرة ، فإننا نجد أنها أخف وزناً من مفرداتها ، أعنى عند تكوين « نواة الهليوم » من وحداتها اختفى جزء من الوزن ، فما من قوة فى الوجود تعيد « نواة الهليوم » إلى مكوناتها الأولى حتى تضيف إليها وزناً يعوض ما فقدته أثناء التكوين ، فإن كبر ما اختفى من مادة أثناء تجمعها صعب تفككها وكان ارتباطها وثيقاً .

ولعل الشمس تحافظ على ضوئها باستعمال هذه العلاقة بين الكتلة والطاقة .

وإن الفكر البدائى يتخيل ما يرى ولا يتخيل غير مايرى ، فإذا رأى ناراً تخيَّل الوقود وحسبه الفحم ، فلا غرابة لو ظن الأولون أن نار الشمس من احتراق الفحم فهى الموقد الإلهى ، ولكن هذا الفرض لم يصبر طويلا مع العلم فلو كان صحيحاً لكانت الشمس فى خبر كان من قديم الزمان .

ولكن تفتق الفكر العلمى وبان له فساد هذا الفرض ، فتفتق عن فرض آخر هو : أن الشمس كرة غازية ملتهبة تنكمش ببطء ، وكلما انكمشت زادت حرارتها بحكم الانكماش ، وجادت بالزيادة . وبلغت بهم الدقة أن قدروا انكماشها اليومى ، ولكن هذا الفرض لم يثبت طويلا، وإن تنبأ بعمر للشمس آطول مما تنبأ به الفرض الأول ، فزاد على العمر أربعة أمثاله . ولعلها صدمة جعلت الفكر ينتقل من النقيض إلى النقيض ، فإذا بفرض جديد يطيل من عمر الشمس إطالة تخرج بها عن نطاق المعقول فى تكوين العالم ، لأنه يرتفع بعمرها إلى ثمانية أمثال عمرها العلمى الذى قدر بعمر أقدم صخر موجود على ظهر البسيطة ، فلقد ارتفع عمرُ الشمس فى حسبانهم عند ما فكر العلماء فى أنها باقية صامدة حتى يفنى آخر جزء من مادتها ، أعنى أنها ستبقى متوهجة حتى تتحول مادة الشمس بأجمعها إلى طاقة إشعاعية ؛ فرض أطال ، وفرض قصَّر ، فلا بد أن يكون هناك فرض وسط بين هذا وذاك ، وقد وفقوا فى اقتناصه إذ قدر عمر الشمس بفضله بألفى مليون سنة .

وأساس هذا الفرض أن جزءاً من المادة ، وليس كلها ، يتحول إلى وميض وهو الجزء الفائض بعد تعقيد المادة ، ويساعد على تعقيد المادة درجة الحرارة فى باطن الشمس ، وهى تبلغ أكثر من ثلاثة آلاف مثل لدرجة حرارة سطحها البالغة ستة آلاف درجة ، ويساعد أيضاً الضغط فى باطنها ، إذ يبلغ تسعمائة مليون ضغط جوى .

يكاد الفـــرض أن يطل فى هذا الجــوّ المـلتــهب والضـغـط الخـانق والهيـدروجين الذى يبلغ ثلث الشمس كـتلة والنسبة الضـئيلة من الآزوت والكربون البـالغة ما يقــرب من الواحد فى المائة هذه النســبة الضـئيلة فى كميتها القوية فى مفعولها ، هى المحرِّض الذى يشارك فى عملية التعقيد ، ويخرج من الـعملية غــير منقــوص ، ومن غير ســوء . فالمسـئول الأول والأخير عن بقاء الشــمس كما هى هو الطاقة الإشعاعـية الناتجة عن تحول «الهيدروجين» إلى « هيليــوم » وقد قدرت وحسبت فجاءت بعــمر للشمس هو قدر عمر أقدم صخر يوجد على ظهر البسيطة ولكيلا أفجع الأولين فى تفكيـــرهم ســأوافـق على أن الشـــمس هى : الموقــد الإلهــى ، وقــوده «الهيدروجين» ورماده « الهيليوم » .

وعلى هذا الأساس بنيت فكرة استخدام المواد الاندمـاجية لاستحداث الطاقة .

فهناك ثقــيل فى المادة وخفيف ووسط بين خفــيف وثقيل ، والوسط هو أكثر المواد ثباتاً واستقرار أما الثقيل فهو فى طريق الانحلال إلى الثبات والاستقرار بتفككه ، مع تخلصه من فائض من مادة عن طريق الإشعاع . أما الخفيف فــهو طيع إلى تعقيد أملا فى ثبات على ثبــات واستقرار على ستقرار بتجمعه مع تخلصه من فائض من مادة عن طريق الإشعاع .

النظرية النسبية العامة

أمكن لـ« النظرية النسبية » الخاصة أن تصوع القوانين ، لتطبيقها على حد سواء فى أى من المناطق التى هى حركة منتظمة بعضها بالنسبة لبعض، ومعنى هذا أن المناطق لا تعمل فيها قوى ، إذ لو عملت قوة ما فى منطقة لتسارعت هذه المنطقة وفقدت الانتظام فى حركتها .

وقد رأى « أينشتين » أن يحرر المناطق من هذا القيد قيد الانتظام فى الحركة ، وكان ذلك عام ١٩١٥ عشر سنوات بعد إعلان « النظرية النسبية الخاصة » فكانت « النظرية النسبية العامة » وأمكن لها أن تصوع القوانين لتطبيقها على حدّ سواء ، فى أى من المناطق دون اعتبار لحركتها ، وبذلك تحرر « أينشتين » من « نيوتن » إطلاقاً لتغير تحركه ، تساوى التغير فى كمية التحرك ، وهذا هو أحد قوانين الحركة لـ « نيوتن » وهناك قانون آخر أوحت به التفاحة التى قيل : إنها سقطت على أم رأسه وهو قانون الجاذبية ، ويسمى بقانون التربيع العكسى للجاذبية التثاقلية ، إذ يتناسب عكسياً مع مربع المسافة بين مركزى ثقل الجسمين ، ويتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما .

قانونان مختلفان جد الاختلاف مع « نيوتن » جمعهما « أينشتين » فى نظرية واحدة هى النظرية العامة ، فسر بها ظاهرة الجاذبية الأرضية ، وشرح كيف تجذب الشمس الأرض وكانت نظريته أعم وأهم وأدق

وأشمل من « نظرية نيوتن » فى وصف هذا التجاذب .

وإذا بـ« أينشتين » يطلق العنان لعلمه ولخبرته نحو مثالية علمية وذلك عام ١٩١٨ إذ عن له أن يحاول توحيد القوانين فى قانون واحد يفسر الظواهر كبيرها وصغيرها ، سواء كانت مادة أو طاقة فى ثنايا نوى الذرات ، أو فى الأجرام بين السموات .

ولعله قد شغل بالتفكير فى القوانين التى تفسر لنا الظواهر الطبيعية للإشعاع ، سواء كان إشعاعاً من محطة الإذاعة أو من ضوء مصباح ، وهذه الإشعاعات ، وإن اختلفت اهتزازاً أو قدرة هى جميعاً تسير سرعة واحدة هى السرعة التى يصل إلينا بها نور الشمس .

ومن غريب أمر هذه الإشعاعات أنها تهئ الجو المحيط بها ليقع تحت تأثيرها ولها أثران متلازمان أثر كهربائى وأثر مغناطيسى ، وحيث يظهر الأثر تكون منطقة النفوذ ويصبح مجالا حيوياً للإشعاعات مجالا مغناطيسياً كهربائياً أى « إلكترومغناطيسى » .

ولأهمية هذا المجال اعتدنا أن نسمى هذه القوانين بقوانين المجال ، إذ يكفى أن يعرف أثر المجال تبعاً للزمان والمكان ، حتى نستنتج الخواص الطبيعية للإشعاع .

ويظهر أن الإشعاعات ليست هى الوحيدة التى تنفرد بمجال «إلكترومغناطيسى» بل كل متحرك من كهرباء له مجال «

إلكترومغناطيسى» لذا كانت نظرية المجال خلطاً بين مجال الإشعاعات ومجال الجسيمات المكهربة .

أعود وأقول لعل « أينشتين » قد تأثر تأثراً عميقاً بهذه القوانين ، لأنه وهو يتحدث عن التجاذب جعل للتجاذب مجالا أسوة بمجال هذه القوانين . ولقد ثبت علمياً أن « نظرية أينشتين » للتجاذب قد وافقت التجربة حيث أخفقت « نظرية نيوتن » التى تنادى بالطبيعة . أو ليس من الطبيعى أن تتوهم قوة بين الجاذب والمجذوب ؟ ومن هذه التجارب الفاصلة انحراف الضوء إذا مر بجوار جسم مادى وتأثر بمجاله . وقد ثبت ذلك بما لا يدع سبيلا للشك عندما كسفت الشمس وظهرت النجوم مضئية بجوارها ، فانحرف نورها عند مروره بجوار الشمس المظلمة ، تحقيقاً كما تنبأت به نظرية « أينشتين » .

كذلك حركة الكوكب عطارد وهو أقرب كوكب للشمس تتفق ونظرية « أينشتين » وتختلف و «نظرية نيوتن » ليست أهمية « نظرية أينشتين » فى مطابقتها للواقع فحسب ، بل فى جمالها وبساطتها ، فقد رأت الحيز الحلو من المادة والكهرباء والإشعاعات حيزاً منبسطاً ، لو أردت وصفه وتحديد مواقعه استعنت بهندسة « إقليدس » التى درسناها فى المدارس ، ولكن إذا أدخلت على الحيز أجساماً مادية أو كهرباء أو إشعاعات التوى الحيز ، وأصبح جزء منه ملتوياً ، لو أردت وصفه وتحديد مواقعه ما أسعفتك هندسة « إقليدس » ولكنك تلجأ إلى هندسة

أخرى غير مألـوفة ، هندسة ملتوية لا تعترف باستقـامة أقصر خط يصل بين نقطتين ، وكما لا ينبغى للمرء أن يجرى قياسات بالمسطرة على سطح غير منبـسط كالكرة ، كذلك لاينبغى أن نستخـدم هندسة « إقليدس» فى حيز غير منبسط .

ومن خصـائص التواء الحيـز أن المادة تنحدر إلى أسـفل ، ولا أقول تنجذب . وعليه يصبح مجال التجاذب محضاً لا علاقة له بقوى الطبيعة.

وهذا عكس المجال «إلكتومغناطيسية» فله علاقة وثيقة بالقوى الطبيعية فهو مجال طـبيعى ، لقد وحد « أينشتين » اتجاه التفكيـر بأن جعل مجالا للتجاذب نسجاً على منوال المجال « إلكترومغناطيسى » ولكن شخصية هذا المجال غير شخـصية ذاك فهناك ازدواج فى الشخصية ؛ شخـصية هندسية وشخصية طبيعية .

لذا عكف منذ عـام ١٩١٨ على التوحـيد ليـذيب الشخـصيـتين فى شخصية واحدة ، شخصـية هندسية ؛ ويذيب القوانين فى قانون واحد ، عله يصل إلى التوحيـد ، ولكنه مات قبل أن يصل إلى نتيجـة حاسمة ، بل لعل « النظرية النسبـية العامـة » تحتاج إلى تعديل وإلى كـمال. وإن وصلت « النظرية النسبية الخاصة » إلى الكمال على مانرى ، هناك مسائل كثـيرة فى النظرية العامـة موضع نقاش بيـنه وبين معاصـريه من العلماء أغفلتـها رغم أهميتـها ، ولكن المقام لا يحـتمل أكثر مما احـتمل فى هذه العجالة .

إن طريق « النسبية » غير طريق الذرة ، ولو نظرنا نظرة عميقة إلى الطبيعة لوجدنا بديع ما صنع البارئ ، فما من ظاهرة إلا أطل منها جمال الاتساق وتناسق التكرار ، ألا ترى الشمس وقد رفعت وجعلت الكواكب تدور حولها « كل فى فلك يسبحون » لا تصادم ولا تقارب ولا ابتعاد ، هذه الصورة التى أودعها الله المجموعة الشمسية ارتسمت فى أعين العلماء فتصوروها مكررة فى الكون بأجمعه ، مكررة فى كل كائن فى الوجود ، فقد حببت إليهم هذه الصورة حتى فرضوها فرضاً ولكنه فرض موفق .

وما المادة إلا أعداد مكرَّرة لهذه الصورة كالحائط ما هو إلا أعداد مكرَّرة لقالب الطوب ولكننا نرى قالب الطوب ، ولا نرى هذه الصورة . وذلك لأن أعيننا خلقت لترى مقاساً معيناً يصغر إلى حد مقدر تعجز العين عن رؤية أصغر منه . وهناك مقاس آخر أصغر من هذا الحد نستعين بأدوات التكبير والتقريب لنراه ، ويمتاز المقياس الأول والثانى بأنه بلغ من الضخامة مبلغاً يجعله يعكس إلى أعيننا الضوء الساقط عليه ، فتحس بوجوده ، إذ أننا فى الواقع لا نرى الجسم ولكنا نستقبل الضوء المنعكس منه على شبكة العين فنراه ، لذا كان وجود الجسم لا يكفي لرؤيته فلا بد من سقوط الضوء عليه وانعكاسه حتى نلمحه ، ولكن هناك أجساماً بلغت من الصغر مبلغاً يجعلها عاجزة عن صدّ الضوء الغامر لها فلا ينكص على عقبيه ، ولا يصل إلى أعيننا لنبصره ، ومن هذه الأجسام الصورة المجسمة التى حدثتك عنها شمس تدور حولها كواكب .

ويحدد ثقل الشمس أو خفتهاعدد الكواكب التي تدور حولها ، وبعد كل كوكب . ولكن المادة الواحدة شموسها واحدة ، ويصاحب كل شمس عدد من الكواكب واحد . إذن الفارق بين مادة ومادة هو ضخامة الشمس أو ضآلتها ، ولا أقول الفارق عدد الكواكب إذ الشمس هي الأساس والكواكب تبع لها ، فالشمس يمكنها أن تعيش بغير كواكب ولكن الكواكب لا يمكنها أن تدور بغير شمس .

والشمس مكونة من وحدات متماسكة تماسكاً شديداً ، وهي وحدات متساوية بعضها مكهرب والبعض الآخر غير مكهرب .

والشمس بلغة العلم تسمى نواة ، والكواب يسمى « إلكتروناً » والوحدة المكهربة تسمى « بروتوناً » والوحدة غير المكهربة تسمى «نيتروناً» والنواة بإلكتروناتها الدائرة تسمى ذرة .

وربما تنتقل « الإلكترونات » من مدار إلى مدار ولا يكون لها قرار بين مدار ومدار ، لذا يقول « برتراند رسل » في كتابه «هامش الفلسفة»: إن ناموس دنيا الذرة ثورة وليس تطوراً ، يقفز « الإلكترون » من مدار إلى مدار فجأة دون سابق انذار ، فلا اتصال في الحركة ، بل هناك تقطع ، وهذا لا يحدث أبداً في المناطق الخالية حيث تجرى الأمور انسيابياً دون قفزات ، و« النظرية النسبية » لها سيادة على هذه المناطق . بل لها فلسفة خاصة بها لن أحاول أن أخوض فيها ، ولكني أضع الخطوط العريضة فقط .

جعلت للضوء مـركز الامتيـار فكانت سرعته فى الفراغ مطـلقة ثابتة دائماً ، حتى ولو كـان للرصد سرعة تقارب سـرعة الضوء . ثم أنكرت المركزية فى العـالم ، وجعلت كل منطقة كـفيلة بقوانينهـا وإن تشابهت القـوانين ، وبينت أنه لا يصح أن نسـتنتج سلوك الأجـسـام المتـحركـة بسرعات كبيرة من سلوكها عندما تتحرك بسرعة بطيئة .

وكذلك أنكرت وجود زمان بمفرده ، ووجـود مكان مستقل بمفرده ، وبينت أن بساطة العلم فى تفـسير الظواهر الطبـيعية تحتم انـدماج الزمان والمكان حـيث لا يمكن تميـيز شـقيـه ، وهناك اتحـاد لا يقل أهميـة عن الاندماج ، فـأصبحنا نعـجز عن التمـييز بين الكتلة والطاقـة ، حتى إننا وجدنا طاقـة الجسم الساكن هى كتلتـه الساكنة ، لو اتخذنا سرعـة الضوء وحدة للسرعات ، وبذلك وضعت الكتلة تحت وصاية الطاقة .

بل هناك إذابة لا تقل عن الاندماج والاتحاد ، وهى إذابة الطبيعة فى الهندسة ، فأصبح مـجال التجاذب الطبيعى ليس مجال قـوة طبيعية ، بل هو مجال هندسى غير منبسط وغير متزوّد بقوة ما .

لعل القارئ يلمح بين سطور هذه العجـالة أن « النسبية » أسلوب له خصائصه فى التفكير العلمى ، تعدّاه إلى الفلسفة والاجتماع والاقتصاد .

مقدمة المؤلف

أتمنى لهذا الكتاب أن يوفر للقارئ الذى يهـتم بدراسة نظرية النسبية فلسفيـا وعمليا وسيلة سهلة يحـقق بها أمله فى دراستها دراسـة تامة حتى ولو لم يكن متمكنا من الجهاز الرياضى الذى تتطلبه دراسة الفيزياء النظرية. وعلى الرغم من قلة صفـحات هذا الكتاب فإن قراءته تسـتلزم عزما لايلين ومثـابرة على تعمق الفكر ومسـتـوى ثقافيـا يضارع مسـتوى القـبول فى الجامعـات. ولقد بذلت غاية الجهـد فى سبيل توضيح الأفكار الأسـاسية أحسن إيضاح فـوضعتها فى أبسط صـورة وأسهلها فهمـا. أما من حيث التسلسل والإرتباط فقد تركتها فى مجموعها على سجيتها مثلما خطرت لى أصلا. ولم أدخر وسعاً فى سبيل الوضوح الكامل فلم أسلم فى كثير من المواقف من التكرار ولم أهتم أى أهتـمام ببلاغـة الأسلوب وطلاوته فإنى مثل ل. بولتزمان - ذلك العالم الفذ - أعتقد أن أمور التألق يجب تركها للترزى والإسكاف. ولست أدعى أنى قد باعـدت بين القارئ والصعوبات المتصلة بالموضـوع إنما قصدت إلى مـعالجة الأسـاس الفيزيائى التـجريبى للنظرية بطريقة حانية عمادها التيسير والرفق حتى لا أترك القارئ الذى لا يلم بالفيزياء يشعر بالتيه أو بالضياع كمن أضلته الأشجار عن الغابة. إنى أتمنى أن يهيئ هذا الكتاب للقراء لحظات من التفكير الملهم.

ديسمبر ١٩١٦ أ. أينشتين

تعليق بمناسبة الطبعة الخامسة عشر

لقد أضفت فى هذه الطبعة الخامسة عشرة ملحقا خامسا يتضمن آرائى فى مشكلة المكان عموما والتغيرات التدريجية التى طرأت على تصورنا له نتيجة لوجهة النظر « النسبية » لقد أردت أن أوضح أن المكان ليس بالضرورة شيئا يمكن أن نمنحه وجودا منفصلا بطريقة مستقلة عن الأجسام الموجودة فعلا فى دنيا المادة . إن الأجسام المادية ليست «فى المكان» بل هى « امتداد مكانى » وبهذه الطريقة يفقد «تصور المكان الفارغ» معناه .

٩ يونيو سنة ١٩٥٢ أ. أينشتين

الجزء الأول

نظرية النسبية الخاصة

الفصل الأول

المعنى الفيزيائي للقضايا الهندسية

لعل الغالبيـة الكبرى ممن يقرءون هذا الكتاب قد تعرفـوا فى حياتهم الدراسيـة على ما فى هندسـة إقليدس من منطق نبيل ولـعلهم يذكرون - احتراماً لا حباً - ذلك الصرح الشامخ الذى ساقهم فى تسلق درجة أساتذة أمناء مهرة طوال ساعات لا حـصر لها . ولاشك أن القارئ سينظر بعين الريبة والازدراء إلى كل من يجرؤ على التشكيك فـى صدق أية قضية من قضايا الهندسة ونظرياتها مـهما كانت ثانوية . ولاشك أن السـر فى ذلك هو ما تولد فى نفس القارئ خـلال تجربته السابقة مع الهندسـة من شعور وطيد بالثـقة . ولكن . . . أليس لهـذه الثقة حـدود . . . ؟ لو أن أحد سألك أيها القارئ العزيز : ماذا تعنى بتـأكيدك أن هذه القضايا صادقة ؟ لعلك لو تأملت قليـلا مضمـون هذا السؤال والآفاق التى يفـتحهـا أمامنا لرأيت أركان هذه الـثقة الكاملة قـد اهتزت واكـتنفتهـا الظلال . ولذلك أعتقد أنه لابد لنا أن نتأمل هذا الأمر معا بإمعان وروية .

إن الهندسـة تنبع من تصورات مـعينة مثـل تصور المسـتوى والنقطة والمستقيم . ونحن نستطيع أن نربط بهذه التصورات أفكاراً محددة نوعا ما

نتمثلها جيدا . والهندسة تقوم بجانب ذلك على قضايا بسيطة معينة «بديهيات» ونحن نميل بسبب حسن تصورنا لتلك الأفكار المحددة إلى التسليم بأن هذه البديهيات صادقة . ثم بطريقة منطقية دامغة لاسبيل إلى إنكار وجاهتها نقيم الدليل على أن كل القضايا الباقية تتسلسل من البديهيات ، أى أننا نقيم بذلك البرهان عليها . ومن هنا نرى أن قضايا الهندسة تكون صحيحة صادقة) عندما تكون مشتقة من البديهيات على النحو المسلم به . وهكذا نجد أن البحث فى «صدق» القضية الهندسية الواحدة يتحول فى آخر الأمر إلى البحث فى «صدق البديهيات» . ولكنا قد عرفنا منذ أمد بعيد أن البحث فى صدق البديهيات لا يمكن معالجته بالطرق الهندسية بل إنه لا معنى له بالكلية فلا وجه لأن نتساءل مثلا إن كان صدقاً أنه لا يوجد إلا خط مستقيم واحد يصل بين نقطتين أم لا . كل ما يمكن أن نقوله هو أن هندسة إقيلدس تعالج أشياء تسميها «خطوطا مستقيمة» وتنسب لأى واحد منها خاصية التعين بذاته بنقطتين واقعتين عليه : ونحن نعلم أن التصور الذى نعبر عنه بكلمة «صادق» نقصد به عادة شئ له وجود حقيقى . (والهندسة ليست معنية بعلاقات المفاهيم الداخلة فيها بالأشياء الواقعية ولكنها معنية فقط بالصلات المنطقية لهذه المفاهيم فيما بينها .

وليس من العسير أن نرى لماذا كنا على الرغم من هذا مسوقين إلى القول «بصحة» القضايا الهندسية . فالمفاهيم الهندسية تناظر إن كثيرا أو قليلا أشياء بالذات لها وجود فى الطبيعة ، وهذه الأشياء دون ريب

السبب الوحيد فى نشأة هذه المفاهيم . ولاشك أنه يجب على الهندسة أن تتنكب هذا الطريق إذا أرادت أن يكون لبنائها أكبر وحدة منطقية ممكنة . خذ مثلا تلك العادة المتأصلة فى تفكيرنا فى أن كل ما فى المسافة هو موضع نقطتين على جسم متماسك . أو أيضا ما درجنا عليه من اعتبار ثلاث نقط على استقامة واحدة إذا استطعنا أن نجعل مواضعها الظاهرية تنطبق على مسار شعاع بصرى واحد ، وذلك إذا أحسنا اختيار الموضع الذى نرصد منه هذه النقط الثلاث .

ولكنا نستطيع أن نستعيد ثقتنا الأولى إلى حد ما وذلك إذا أضفنا إلى قضايا هندسة إقليدس القضية التالية : «تناظر نقطتان على جسم جاسئ نفس المسافة دائماً (الفترة الخطية) مهما حدث من تغيرات فى موضع الجسم » عند ذلك نجد أن قضايا هندسة إقليدس تتحول فجأة إلى قضايا عن المواضع النسبية الممكنة للأجسام الجاسئة[١] . والهندسة التى أكملت بهذه الصورة يجب أن تعالج على اعتبارها فرعا من الفيزياء[٢] .

---

(١) يتبع هذا أن يرتبط جسم طبيعى بخط مستقيم وهكذا تقع النقط أ ، ب ، جـ على جسم جاسىء على خط مستقيم حينما نختار النقطة ب وقد حددنا من قبل النقطتين أ ، جـ بحيث يكون مجموع المسافتين أ ب ، ب جـ أقصر ما يكون . وسيفى هذا الاقتراح الناقص بالغرض الذى ننشده حاليا .

(٢) هذا هو ما يسمى بفيزياء الهندسة وهو حجر الزاوية الذى شاد عليه ريمان هندسة الفضاء الكروى المنحنى مترسما خطى لوباتشفسكى أبو الهندسات اللاإقليدية وجاوس الذى اهتدى إلى الوسيلة الرياضية العامة لدراسة المتصلات متعددة الأبعاد . وإذا =

ويحق لنا عندئذ أن نتساءل عن صدق قضايا الهندسة مفسرة على هذا النحو . لأننا أصبحنا نستطيع أن نختبر هل تتفق فعلا هذه القضايا مع الأشياء الحقيقية التى ربطناها فيما سبق بالأفكار الهندسية أم لا . أو بعبارة أخرى - ولو أنها أقل دقة - يمكننا أن نعبر عن ذلك بأن نقول إننا نقصد بصدق قضية هندسية ما بهذا المعنى قابليتها للتنفيذ باستعمال المسطرة والفرجار .

وهكذا نرى بوضوح أن الاقتناع بصدق القضايا الهندسية بهذا المعنى يستند كلية على تجربة لا يمكن اعتبارها بحال من الأحوال كاملة بل هى أقرب ما تكون إلى النقص ولكننا مع ذلك سنسلم الآن بصدق القضايا الهندسية وسنرى فيما بعد (فى نظرية النسبية العامة) أن هذا الصدق محدود ، وسنحاول أن نعين مدى هذه الحدود .

= أضفنا إلى هذه الأفكار فكرة تساوى الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية حصلنا على هيكل نظرية النسبية العامة (المترجم) .

الفصل الثانى

مجموعة الإحداثيات

لقد شرحنا فى الفصل السابق التفسير الفيزيائى للمسافة واستناداً إلى هذا التفسير نستطيع أن نحـدد بسهولة المسافة التى تفصل بين نقطتين على جسم جاسىء وذلك بوساطة القياس . وكل ما نحـتاج إليه للقيام بعملية القيـاس هو «مسافـة ما» ولتكن «القـضيب ل مثـلا» نتفق عليـها مقـدماً ونعتـبرها وحـدة عيـارية للقياس فـإذا كانت أ ، ب نقطتين عـلى جسم جاسىء فـإننا نستطيع إنشاء الخط الذى يـوصل بينهما بالطرق الهندسـية ونسـتطيع ابتداء من أ أن نطبق الـقضـيب على هذا الخط وأن نكرر ذلك بحيث تطابق نقطة ابتدائه فى كل مرة نهايته فى المرة السابقة إلى أن نصل إلى ب، وعدد مرات تكرار هذه العملية هو القياس العددى للمسافة أ ب. إن هذا هو أساس كل عمليات قياس الأطوال[1].

إن كل وصف لمسرح أية حادثة أو لموضع جسم ما فى الفضاء يستند

(١) لقد فرضنا هنا أنه لم يتبق شيء أى نتيجة القياس عدد صحيح ونحن نتغلب على هذه المشكلة أيضا باستعمال قـضبان القيـاس المقسمة إلى أجـزاء واستعمـالها على هذه الصورة لا يتطلب تعديلا جوهريا فى طريقة القياس .

أساساً إلى تعيين النقطة التى تناظر مسرح الحادثة أو موضع الجسم من نقط مجموعة الإسناد . وليس هذا النحو فى وصف مسارح الحوادث ومواضع الأجسام وقفاً على العلم وحده بل إنه فى الواقع عين ما نلجأ إليه فى حياتنا اليومية . إننا إذا تأملنا تحليلياً التحديد المكانى : «حادثة فى ميدان التحرير بالقاهرة مثلا» أمكن أن نصل بسهولة إلى النتيجة التالية : إن الأرض هى مجموعة الإسناد التى تسند إليها التعيين المكانى ، وميدان التحرير نقطة محددة جيداً على سطح الأرض أطلق عليها هذا الاسم وهذه النقطة هى النقطة التى تتفق ومسرح الحادثة فى المكان[1] .

وهذه الطريقة البدائية فى تعيين المكان لا تصلح إلا بالنسبة للأماكن التى تقع على سطوح الأجسام الجاسئة وبشرط وجود نقط على هذه الأجسام يمكن تمييزها عن غيرها من النقط . ولكننا نستطيع أن نتحرر من كل هذه القيود دون أن نغير الأساس الذى نعتمد عليه فى تعيين المواضع . فإذا كانت هناك سحابة فوق ميدان التحرير مثلا فإننا نستطيع أن نعين مكانها بالنسبة إلى سطح الأرض بأن نقيم عموداً يصل بينها وبين الميدان وطول هذا العمود مقيساً بقضيب القياس العيارى مشتركا مع ما يحدد نقطة قاعدة العمود يعطيانا معاً تحديداً كاملا لموضع السحابة فى الفضاء . ومن هذا المثل نرى بوضوح الطريقة التى تم بها تهذيب الفكرة

(١) ليس من الضرورى هنا أن نتقصى إلى أبعد من ذلك معنى عبارة الاتفاق فى المكان فهذا التصور واضح الوضوح الكافى لتجنب اختلاف الرأى حول امكان تطبيقه عمليا .

الأساسية فى عملية تحديد المواضع عموماً . وتتلخص خطوات هذه العملية فيمايلى :

(أ) أن نتخيل الجسم الجاسىء الذى نسند إليه التعيين المكانى مزوداً على نحو يمكنه من الوصول إلى الجسم المراد تعيين موضعه .

(ب) نستعمل فى تحديد موضع الجسم عدداً بدلا من الالتجاء إلى نقط إسناد معينة (وهو فى هذه الحالة طول العمود مقيساً بقضيب القياس «وحدة القياس») .

(جـ) نستطيع أن نحصل على ارتفاع السحابة حتى ولو لم نقم العمود فعلا فنحن إذا رصدنا السحابة ضوئياً من مواقع مختلفة على الأرض. وإذا أدخلنا فى حسابنا خواص انتشار الضوء نستطيع أن نعين طول العمود الذى كان علينا أن نقيمه حتى نصل إلى السحابة .

مما تقدم نرى أنه سيكون من المستحسن لو أمكن عند وصف المواقع عموماً أن نتحرر بطريقة القياسات العددية من ضرورة الالتجاء إلى ذكر مواقع معينة لها أسماء خاصة تتميز بها على مجموعة الإسناد التى نرجع إليها . ونحن نحقق ذلك فى القياسات الفيزيائية بتطبيق مجموعة إحداثيات **ديكارت** .

وهى تتكون من ثلاثة سطوح مستوية متعامدة ومرتبطة ارتباطا جاسئا بجسم جاسىء . وبتحديد موقع أية حادثة إذا أسندناه إلى مجموعة الإسناد بتعيين أطوال ثلاثة الأعمدة أو الإحداثيات (س. ص. ع) التى

يمكن إسقاطها من مسرح الحادثة على ثلاثة السطوح المستوية التى تكون مجموعة الإسناد . وأطوال هذه الأعمدة الثلاثة يمكن تحديدها بسلسلة من عمليات القياس تتم باستعمال قضبان القياس تبعاً للقواعد والطرق التى وضعتها هندسة إقليدس .

وليس من المستطاع دائماً فى الحياة العملية الحصول على السطوح الجاسئة التى تتكون منها مجموعة الإسناد ، وفوق ذلك فإن مقادير الإحداثيات لاتحدد عملياً بطريق القياس المباشر بقضبان القياس فقط ولكن بطرق غير مباشرة أيضا ، فإذا كنا نريد أن تحتفظ النتائج التى توصلنا إليها فى الفيزياء والفلك بوضوحها يجب أن لا يغيب عن بالنا أن تعيين المواقع يفقد معناه الفيزيائى مالم يخضع للاعتبارات التى ذكرناها آنفاً[1] .

وهكذا نصل إلى النتيجة التالية : إن وصف الحوادث التى تتم فى الفضاء يحتم علينا الالتجاء إلى مجموعة إسناد جاسئة ننسب إليها هذه الحوادث ، والعلاقة الناتجة تسلم جدلا بأن قوانين الهندسة الإقليدية تنطبق على المسافات باعتبار المسافة يمثلها فيزيائياً اتفاق سابق على علامتين على جسم جاسىء .

---

(١) لا يصبح اكمال وتحوير هذا الاعتبار ضروريا إلى أن نعالج نظرية النسبية العامة التى سنناقشها فى الجزء الثانى من هذا الكتاب .

الفصل الثالث

المكان والزمان فى الميكانيكا الكلاسيكية

«إن الميكانيكا تهدف إلى وصف كيفية تغيير الأجسام لمواقعها فى المكان بمرور الزمن» . لاشك أنى لو ألقيت مثل هذا القول على علاته دون تفكير جدى وإيضاحات مفصلة عن أهداف الميكانيكا أكون قد أثقلت ضميرى بآثام جسام ضد روح الوضوح المقدسة .

والآن دعنا نكشف الغطاء عن هذه الآثام وأولها هو عدم وضوح ما نقصده هنا بكلمتى «الموقع» و«المكان» . فإذا فرضنا أنى أقف بنافذة عربة قطار يسير بسرعة انتقال منتظمة وأنى أسقطت حجراً على طريق السكة الحديدية دون أن أقذف به فإنى إذا تغاضيت عن أثر مقاومة الهواء أجد أن هذا الحجر يظهر بالنسبة لى كأنه يسقط فى خط مستقيم بينما يراه رجل واقف على جانب الطريق يسقط إلى الأرض فى منحنى يسمى قطع مكافىء . وإنى أتساءل الآن هل تقع النقط التى مر بها الحجر « فى الحقيقة» على خط مستقيم أو على منحنى قطع مكافىء ؟ وفوق ذلك ماذا نقصد هنا بعبارة الحركة «فى المكان» . . . ؟ إننا فى ضوء الاعتبارات التى قدمناها فى الفصل السابق نجد أن الجواب على هذا السؤال واضح

للعيان والسبيل إليه هو أن نحذف أولا وقبل كل شيء تلك الكلمة الغامضة «المكان» التى تقتضى الأمانة أن نعترف بأننا لا نستطيع أن نكون عنها أدنى فكرة ، ثم نحل محلها عبارة «الحركة بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاسئة» . أما المواقع بالنسبة إلى مجموعة الإسناد (عربة القطار أو قضيب السكة الحديدية) فقد سبق لنا تعريفها تفصيلا فى الفصل السابق فإذا وضعنا بدلا من عبارة «مجموعة الإسناد» عبارة «مجموعة الإحداثيات» وهى فكرة رائعة يمكن الاعتماد عليها فى الوصف الرياضى - نجد أننا قد أصبحنا فى موقف يؤهلنا لأن نقول : «إن الحجر يقطع عند سقوطه خطاً مستقيما بالنسبة إلى مجموعة إسناد مرتبطة ارتباطاً جاسئا بعربة القطار ولكنه بالنسبة إلى مجموعة إسناد مرتبطة ارتباطاً جاسئا بالأرض قضيب السكة الحديدية) يقطع قطعاً مكافئاً «ونحن نرى بوضوح بفضل هذا المثل أنه لا وجود لشيء مثل «مسار مستقل الوجود» (حرفياً منحنى المسار[1] » إنما كل ما هناك هو مجرد مسار نسبى بالنسبة إلى مجموعة إسناد خاصة .

ولكى يكون وصفنا للحركة كاملا يجب أن نعين كيف يغير الجسم موقعة بمرور الزمن . أى أننا يجب أن نذكر بالنسبة إلى كل نقطة على المسار وقت وجود الجسم بهذه النقطة . وحتى هذه المدلولات لا تكفى لأن تجعل وصفنا للحركة كاملا إنما يجب أن يضاف إليها تعريف للزمن يجعل من المستطاع اعتبارها - وهى قيم زمانية أصلا - مقادير (نتائج

---

(١) أى المنحنى الذى يتحرك عليه الجسم .

للقيـاس) يمكن معرفـتها عن طريق الملاحـظة وفى حالة المثل التوضـيحى السابق نصل إلى تحقيق هذا الهدف - على أساس الميكانيكا الكلاسيكية - بأن نتصور أن هناك ساعتين متشـابهتين فى التركيب إحداهما مع الراصد الذى يطل من نافذة القطار والأخرى مع الراصد الذى على جانب الطريق الحديدى وأن نطلب إليهما أن يحدد كل منهـما موضع الحجر بالنسبة إلى مجموعة إسناد كل منهما فى كل لحظـة تعينها الساعة . ونحن نتجاوز فى هذا عن الخطأ الذى يترتب على سرعة انتـشار الضوء المحددة . وسنتكلم بالتفصيل عن ذلك وعن صعوبة أخرى قائمة هنا فى فصول تالية .

الفصل الرابع
مجموعة الإحداثيات الجليلية

كلنا نعلم جيداً أننا نستطيع لو شئنا أن نضع القانون الأساسى لميكانيكا جاليليو - نيوتن وهو المعروف بقانون القصور الذاتى على النحو الآتى : « كل جسم معزول بدرجة كافية عن بقية الأجسام يستمر ساكناً أو متحركاً بحركة منتظمة فى خط مستقيم» . وهذا القانون لا يدلنا إلى حد ما على حركة الأجسام فحسب بل إنه يشير أيضاً إلى مجموعات الإسناد أو مجموعات الإحداثيات الممكنة فى الميكانيكا والتى يمكن الالتجاء إليها عند الوصف الميكانيكى . فالنجوم الثابتة التى يمكن رؤيتها أجسام معزولة بدرجة كافية ، ويمكن أن يطبق عليها قانون القصور الذاتى إلى درجة عالية من التقريب . ولكننا إذا استعملنا مجموعة إحداثيات مرتبطة بالأرض ارتباطاً جاسئاً نجد أن كل نجم ثابت يتحرك بالنسبة إلى هذه المجموعات فى دائرة هائلة القطر خلال يوم فلكى وهذا يجعل هذه المجموعات تتعارض مع نص قانون القصور الذاتى ولذلك إذا أردنا التمسك بهذا القانون وجب علينا قصر إسناد الحركات عموما على مجموعات الإحداثيات التى تكون حالتها من الحركة بحيث ينطبق عليها

قانون القصور الذاتى وتسمى «مجموعة إحداثيات جاليلية » ولا تعتبر قوانين ميكانيكا **جاليليو - نيوتن** صحيحة إلا بالنسبة إلى مجموعات الإحداثيات الجاليلية هذه فقط .

الفصل الخامس

مبدأ النسبية (بالمعنى المقيد)

ذ

دعنا نعود تلمساً لأقصى وضوح ممكن إلى مثل عربة القطار التى تتحرك بسرعة منتظمة . إننا نسمى حركتها انتقالا منتظماً (منتظماً لأن سرعته واتجاهه ثابتان وانتقالا لأنه بالرغم من أن العربة تغير موضعها بالنسبة إلى قضيب السكة الحديدية فإنها مع ذلك لا تدور أثناء حركتها) ولنفرض الآن أن غراباً يطير بحيث تبدو حركته لمن يرقبها من فوق قضيب السكة الحديدية منتظمة وفى خط مستقيم . إننا إذا كان علينا أن نرصد نفس الغراب الطائر ونراقبه من عربة القطار المتحركة لوجدنا أن حركته سوف تبدو مختلفة السرعة والاتجاه عنها فى الحالة الأولى ولكنها ستظل مع ذلك منتظمة وفى خط مستقيم . ولهذا يمكن أن نقول على وجه التجريد «إذا كانت الكتلة ك تتحرك بانتظام فى خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م فإنها تكون أيضا متحركة بحركة منتظمة وفى خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة إسناد أخرى مَ مادامت مجموعة الإسناد الأخيرة تتحرك بحركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م » وتبعاً لما ذكرنا فى الفصل السابق ترى أنه :

إذا كانت م مجموعة إسناد جاليلـيلة فإن كل مجموعة إسناد أخرى مَ تكون جاليلية أيضاً عندما تكون فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م فـتكون قوانين ميكانيكا **جاليليو - نيوتن** صحيحة بالنسبة إلى المجموعة مَ مثل ما هى صحيحة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م .

والآن دعنا نتقدم خطوة أخرى فى تعمـيمنا فنعبر عن المبدأ على هذا النحو : « إذا كانت مَ مـجموعة إسناد تتـحرك بحركة منتظمـة خالية من الدوران بالنسبـة إلى م فإن كل الظواهر الطبـيعيـة بالنسبـة إلى مَ تخضع لنفس القوانين الطبيعية العـامة التى تخضع لها فى م » ويسمى هذا النص «مبدأ النسبية» (بالمعنى المقيد) .

وعندما كنا مـقتنعين بأن كل الظواهر الطبيعـية يمكن تمثيلهـا بمساعدة قوانين الميكانيكا الكلاسيكية لم يكن هنـاك داع إلى الشك فى صحة مبدأ النسبـية ، ولكنه ظهر شيـئاً فشيـئاً مع تقدم الديناميكا الكهـربائية وعلم البصريات أن الميكانيكا الكلاسيكية لم تعد تـقدم أساساً كافياً لوصف كل الظواهر الطبيـعية ، وعند ذلك قـفز السؤال عن صـلاحية مـبدأ النسبـية وصحته إلى مسرح المناقشة ، ولم يستبعد فى ذلك الحين أن تكون الإجابة عليه بالنفى .

ومع ذلك فهناك حـقيقتـان عامتان ضخـمتان تؤيدان تأييـداً واضحاً صدق مبدأ النسبية . فـالميكانيكا الكلاسيكية بالرغم من أنها أصبحت لا تمدنا بأساس شامل يكفى لأن يـفسر نظرياً كل الظواهر الطبيعـية فإننا لا

نستطيع أن ننكر عليها قدراً عظيماً من «الصدق» حيث إنها تفسر لنا تفسيراً يبلغ حد الروعة فى دقته حركات الأجرام السماوية وعلى ذلك يجب أن يصدق مبدأ النسبية بدقة عظيمة فى مجال الميكانيكا أيضاً . أما أن يصدق بهذه الدقة العظيمة مبدأ عام كهذا فى مجال من مجالات الظواهر وأن يكبو فى غيرهم فأمر يكاد يكون بديهياً أنه غير محتمل .

أما الحجة الأخرى ولو أننا سنعود إليها فيما بعد فتتلخص فى أنه إذا كان مبدأ النسبية (بالمعنى المقيد) خطأ فإن مجموعات الإسناد الجاليلية م ، مَ ، مً . . . إلخ التى تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة لبعضها البعض لن تكون متكافئة من حيث ملاءمتها لوصف الظواهر الطبيعية وفى هذه الحالة سنجد أنفسنا محمولين على الاعتقاد بأن القوانين الطبيعية لا يمكن التعبير عنها بطريقة سهلة إلا فى حالة خاصة واحدة وذلك عندما نكون قد اخترنا كمجموعة إسناد لنا من بين كل مجموعات الإحداثيات الجاليلية مجموعة واحدة م لها حالة خاصة من الحركة، وسيحق لنا عندئذ (وذلك بسبب مزايا هذه المجموعة من حيث الملائمة في وصف الظواهر الطبيعية) أن نسمي هذه المجموعة م فى حالة «سكون مطلق» وكل المجموعات الجاليلية الأخرى مَ حالة «حركة» . فإذا كان طريق السكة الحديدية مثلا يناظر المجموعة م فإن عربة القطار تناظر المجموعة مَ وتكون القوانين الخاصة بالمجموعة الأولى م أبسط من قوانين المجموعة الثانية مَ . وهذا التعقيد فى قوانين المجموعة الثانية مرجعه أن العربة تتحرك « فى الحقيقة

بالنسبة إلى م وسيتدخل مقدار واتجاه سرعة العربة فى تحديد القوانين الطبيعية العامة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ . لذلك كان علينا أن نتوقع مثلا أن تختلف نغمة صادرة عن أنبوبة أرغن محورها فى اتجاه حركة العربة عن نغمة صادرة من نفس أنبوبة الإرغن عندما يكون محورها فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة العربة . ولما كانت الأرض بسبب حركتها فى مدارها حول الشمس تشبه عربة قطار تتحرك بسرعة ٣٠ ك م فى الثانية فعلينا إذا أن نتوقع إذا كان مبدأ النسبية غير صحيح أن يتدخل إتجاه حركة الأرض فى تكييف القوانين الطبيعية ، وكذلك سوف يعتمد سلوك المجموعات الفيزيائية على اتجاهها فى الفضاء بالنسبة للأرض لإنه لما كان اتجاه سرعة الأرض فى دورانها يتغير خلال العام فإنها لا يمكن أن تكون فى حالة سكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م خلال العام كله . ولكنه لم يحدث أبداً أن كشفت الملاحظة الدقيقة عن أى تأثير أو تدخل للاتجاهات فى تحديد القوانين الطبيعية فى الفضاء الأرضى ، أى أننا لم نجد أى اختلاف أو فارق بين خواص الإتجاهات المختلفة فى الفضاء لأنها كلها متكافئة وهذا تأييد قوى لمبدأ النسبية .

الفصل السادس

نظرية تركيب السرعات المستعملة في الميكانيكا الكلاسيكية

تخيل أيها القارئ العزيز عربة القطار تتحرك على القضبان بسرعة قدرها ع وتخيل رجلا يعبر العربة طولا فى اتجاه سير القطار بسرعة قدرها عَ فبأية سرعة يتحرك هذا الرجل بالنسبة إلى قضبان السكة الحديدية .... ؟ إذا ظل الرجل ساكنا فى العربة مدة ثانية فإنه يقطع فى هذه الثانية مسافة قدرها ع مساوية عدديا لسرعة العربة ولكنه فى الواقع نظراً لسيره فى العربة يقطع فى هذه الثانية مسافة إضافية قدرها عَ بالنسبة للعربة وبالتالى بالنسبة للقضبان أيضاً وتساوى عدديا سرعة سيره . وهكذا يكون مجموع ما يقطعه فى الثانية بالنسبة إلى القضبان هو س = ع + عَ وسنرى فيمايلى أن هذه النظرية وتسمى فى الميكانيكا الكلاسيكية نظرية تركيب السرعات لا يمكن الاحتفاظ بها ، أى أن القانون الذى ذكرناه آنفا لا يمثل الحقيقة ولو أننا سنسلم الآن بصحته إلى حين .

الفصل السابع
التناقض الظاهرى
بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية

يصعب أن نجد فى الفيزياء قانوناً أبسط من قانون انتشار الضوء فى الفراغ ؛ فكل أطفال المدارس يعرفون أو يظنون أنهم يعرفون أن هذا الانتشار يحدث فى خط مستقيم بسرعة قدرها ٣٠٠,٠٠٠ ك م فى الثانية . ونحن نعرف على أية حال بمنتهى الدقة أن هذه السرعة واحدة بالنسبة لكل الألوان ، لأنه لو لم يكن الأمر كذلك لما استطعنا رؤية أقل ومضة من نجم ثابت بالنسبة للألوان المختلفة متزامنة وذلك أثناء كسوف ذلك النجم بوساطة جاره المظلم . ولقد استطاع الفلكى الهولندى دى ستر استناداً إلى اعتبارات مماثلة قائمة على دراسة النجوم المزدوجة أن يثبت أيضاً أن سرعة انتقال الضوء لا تتأثر بحركة المصدر الذى يصدر منه والزعم ، القائل بأن سرعة انتشار الضوء تعتمد على اتجاهه « فى الفضاء» زعم فى حد ذاته غير محتمل .

إننا باختصار مدعوون إلى أن نسلم مع أطفال المدارس بقانون ثبوت سرعة انتشار الضوء (فى الفراغ) جـ . من كان يتخيل أن هذا القانون

البسيط قد أوقع علماء الفيزياء أمناء التفكير فى أكبر المآزق الفكرية ...!
دعنا نرى الآن كيف كان ذلك .

إننا نعلم جميعاً أنه يجب علينا أن نسند عملية انتشار الضوء (وكذلك كل عملية أخرى فى الواقع) إلى مجموعة إسناد جاسئة (مجموعة إحداثيات) وليكن طريق السكة الحديدية الذى يمكن أن نتصوره فى فراغ تام فإذا أرسلنا شعاعاً ضوئياً على طول الطريق فإن رأس هذا الشعاع يتحرك بالسرعة حـ بالنسبة للطريق ولكننا إذا تخيلنا عربة القطار تسير بسرعة ثابتة على الطريق قدرها ع فى نفس اتجاه شعاع الضوء فماذا تكون سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى عربة القطار .... ؟ من الواضح أننا نستطيع هنا أن نطبق النظرية التى شرحناها فى الفصل السابق حيث يلعب شعاع الضوء دور الرجل بالنسبة إلى عربة القطار ونستبدل السرعة ع وهى سرعة الرجل بالنسبة إلى الطريق بسرعة الضوء بالنسبة إلى الطريقة وتكون س هى السرعة المطلوبة وهى سرعة الضوء بالنسبة إلى العربة وعلى ذلك يكون لدينا :

$$س = حـ - ع$$

وهكذا يكون انتشار الضوء بالنسبة للعربة أقل من حـ

ولكن هذه النتيجة تناقض مبدأ النسبية الذى أوضحناه فى الفصل الخامس والذى ينص على أن قانون انتشار الضوء فى الفراغ ككل قانون طبيعى آخر يجب أن يظل واحدا سواء كانت مجموعة الإسناد هى طريق

السكة الحديدية أو العربة . ولقد رأينا أن هذا يبدو مستحيلا فى ضوء ما تقدم لأنه إذا كانت سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية هى حـ فإنه تبعاً لما تقدم يجب أن يكون هناك قانون آخر لسرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى العربة وهذه هى نقطة الخلاف مع مبدأ النسبية .

وأمام هذه المشكلة لم يكن هناك بد من الاستغناء عن واحد منهما : مبدأ النسبية أو قانون انتشار الضوء فى الفراغ والقراء الذين تتبعوا جيداً الفصول السابقة يتوقعون بالتأكيد أننا سنقف فى صف النسبية وذلك لأنه شديد الإقناع ، غاية فى البساطة وطبيعى جداً وفى هذه الحالة يجب استبدال قانون انتشار الضوء فى الفراغ بقانون آخر أكثر تعقيداً ولكنه يتفق ومبدأ النسبية . ولكن تقدم الفيزياء النظرية قد أوضح بجلاء أن هذا التعديل أمر غير مستطاع فقد أثبتت الأبحاث النظرية التى كان لها أثر بالغ والتى أجراها **هـ. أ. لورنتز** على الظواهر الديناميكية الكهربية والظواهر الضوئية المتعلقة بالأجسام المتحركة أن التجربة فى هذا المضمار تؤيد تماماً تفسيراً للظواهر الكهرومغناطيسية يستلزم الاحتفاظ بقانون ثبوت سرعة الضوء فى الفراغ . وهنا احتدام الصراع بين الرأيين . وقد مال فزيائيون كبار عندما وصلنا إلى هذا الوضع إلى التخلى عن مبدأ النسبية بالرغم من أن أحداً لم يتوصل بأية حال من الأحوال إلى نتائج تجريبية تتعارض مع هذا المبدأ .

وفى هذه الأزمة المستحكمة تقدمت نظرية النسبية إلى الحلبة وأدلت

بدلوها وبدا واضحاً عند ذلك تمام الوضوح نتيجة لتحليل تصورات الفيزياء عن المكان والزمان أنه « لا أثر فى الحقيقة لأى تعارض بين مبدأ النسبية وقانون انتشار الضوء » . وإننا بالتمسك بانتظام بكلا هذين القانونين نستطيع الوصول إلى نظرية متماسكة منطقياً . ولقد سميت هذه النظرية بنظرية النسبية الخاصة تمييزاً لها عن النظرية الأوسع التى سنعالجها فى آخر هذا الكتاب . أما فى الصفحات التالية فسنقدم الأفكار الأساسية فى نظرية النسبية الخاصة .

الفصل الثامن

فكرة الزمن فى الفيزياء

هـب أن صاعقتين جويتين أصابتا قضبان السكة الحديدية المعهودة فى مكانين ا ، ب متباعدين جداً . وهب فوق ذلك أنى أكدت لك أن هاتين الصاعقتين قد حدثتـا في وقت واحد . إنى لو سألتك أيها القارئ العزيز هـل هناك أى مـعنى لهـذا القـول ؟ لأجـبت على الفـور بالإيجـاب . ولكنـى لو طـالبتك بـأن تشرح لى بـإسهـاب ودقـة مـعنى هذا الكلام لوجـدت بعــد قليل من التـأمل أن الأمـر ليس هينـاً كمـا يبـدو لأول وهـلة .

وربما خطرت لك بعـد قلـيل هذه الإجـابة : «إن مـعنى هذا الكلام واضح لا يحتاج إلى تفسـير وطبيعى أن الأمر سيـحتاج إلى بعض التدبر لو كان علىّ أن أقرر عن طريق الملاحظة ما إذا كـانت الصاعقتان فى هذه الحالة قد حدثتا في آن واحد أم لا » . ولكنى شخصيا لا يمكن أن أرضى بهذه الإجـابة للسبب التـالى : هب أن فلكيـاً ماهراً استطاع أن يـكتشف خـلال تأمـلاته العبـقرية أن الصـاعـقة لابد أن تصـيب ا ، ب فى وقت واحد ، فعند ذلك سيكون علينا أن نختـبر إذا كانت هذه النتيجة النظرية

تتفق والحقيقة ، وعند ذلك ستجابهنا نفس الصعوبة التى تقابلنا فى كل أمور الفيزياء التى تتدخل ، وعند ذلك ستجابهنا نفس الصعوبة التى تقابلنا فى كل أمور الفيزياء التى تتدخل فيها فكرة الآنية أو التزامن . إن هذا التصور لا وجود لها بالنسبة إلى عالم الفيزياء ما لم تتح له فرصة اكتشاف ما إذا كان قد تحقق فعلا أم لا . وهكذا نرى أننا فى احتياج إلى تعريف الآنية وتحديد معناها تعريفا يمدنا بوسيلة نستطيع بها فى الحالة الراهنة أن نقرر تجريبيا هل حدثت الصاعقتان الجويتان فعلا فى وقت واحد أم لا . وطالما لم يتوافر هذا الشرط ولم أحقق هذه النتيجة فإنى أنا عالم الفيزياء (وبالطبع أيضا إن لم أكن عالم فيزياء) أخدع نفسى حينما أتصور أننى أستطيع أن أعطى النص على الآنية أى معنى (فشرط التسليم بوجود الآنية هو إمكان التحقق منها عملياً وإلا فليس هناك آنية)[1] وإنى أسأل القارىء ألا يتابع القراءة ما لم يكن تام الاقتناع بهذه النقطة .

وربما بعد أن تأملت الأمر مليا خطرت لك الفكرة التالية كوسيلة عملية للتحقق من الآنية ألا وهى أن نقيس المسافة بين أ ، ب وأن نضع راصداً فى نقطة الوسط (و) مزوداً بوسيلة ما (مرآتين متعامدتين مثلا) تمكنه من رؤية أ ، ب معا . فإذا رأى مثل هذا الراصد الصاعقتين فى وقت واحد فهما إذا آنيتان .

---

(١) لم ترد هذه العبارة فى الأصل اضفناها للشرح (المترجم) .

ويسرني جداً أن أوافق على هذا الرأى ولو أنه فى نظرى لا يحسم الموضوع فإنى أشعر أنى ملزم أن أقدم الاعتراض التالى : إن هذا التعريف للآنية صحيح لاشك فى ذلك لو أننى كنت أعلم أن الضوء الذى يرى به الراصد وميض الصاعقة يقطع المسافة (أ و) بنفس السرعة التى تقطع بها المسافة (و ب) ولا نستطيع اختبار صحة هذا الفرض ما لم يكن لدينا وسيلة لقياس الزمن . وهكذا يبدو أننا ندور فى حلقة مفرغة .

وربما بعد تأمل قليل أجبت ساخرا منى ولديك كل العذر قائلا : إننى متمسك بتعريفى السابق للآنية رغم اعتراضك لأن هذا التعريف لا يتعرض فى الواقع للضوء إطلاقاً ، وليس هناك إلا شرط واحد يجب أن يتوافر فى تعريف الآنية لكى يكون صحيحا ألا وهو أنه فى كل حالة واقعية يجب أن يمكننا هذا التعريف من أن نقرر تجريبياً إذا ما كانت الحالة التى نحن بصددها قد تحققت فعلا أم لم تتحقق . وليس هناك مجال للمناقشة فى أن التعريف الذى أقدمه للآنية لاشك يحقق هذا الشرط فكون الضوء يحتاج إلى نفس الزمن لقطع المسافة من (و) إلى (ب) ليس فى الحقيقة تخيلا أو افتراضاً حول طبيعة الزمن الفيزيائية ولكنه مجرد « تعويض » لى مطلق الحرية فى إجرائه لكى أصل إلى تعريف الآنية .

وواضح أن هذا التعريف يمكن أن يستعمل ليعطى معنى محددا لا لحادثين فقط بل ولأى عدد نختاره من الحوادث أيا كانت مواضع مسارح هذه الحوادث بالنسبة إلى مجموعة الإسناد[1] (وهى هنا طريق السكة الحديدية) وهذا يقودنا أيضا إلى تعريف الزمن فى الفيزياء . ولهذا دعنا نتصور ساعات متماثلة التركيب وضعت فى النقط أ ، ب ، حـ من طريق السكة الحديدية (مجموعة إحداثيات) بحيث تكون عقاربها فى آن واحد بالمعنى السابق فى مواضع متماثلة . وفى هذه الظروف نرى أن زمن أية حادثة هو ما تحدده قراءة موضع عقارب أية ساعة من الساعات التى على مقربة من مكان الحادثة . وبهذه الطريقة نجمع بين كل حادثة يمكن رصدها ومقدار زمنى بصورة أساسية .

وهذا التعويض يحمل فى طياته فرضاً فزيائيا آخر مسلماً به يصعب الشك فى صحته ما لم يثبت تجريبيا أن العكس هو الصحيح ذلك هو افتراضنا أن جميع هذه الساعات تتحرك بمعدل واحد مادامت متشابهة التركيب أو بعبارة أدق إذا ضبطت ساعتان فى حالة سكون وفى مكانين

---

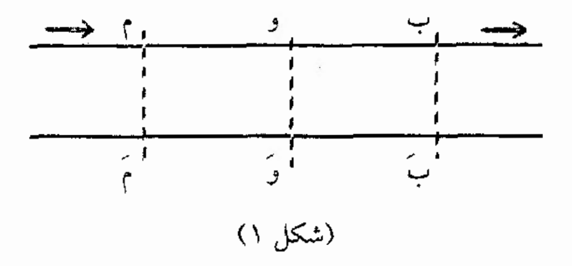
(١) ونحن نفرض أبعد من ذلك أنه عندما تحدث الحوادث أ ، ب ، جـ فى أماكن مختلفة بحيث تكون أ آنية مع ب ، ب آنية مع جـ « آنية بالمعنى المذكور آنفا » يكون شرط آنية الحادثتين أ ، جـ قد تحقق أيضا . وهذا الزعم فرض فيزيائى حول قانون انتشار الضوء ولابد من تحققه إذا كنا نريد الاحتفاظ بقانون ثبوت سرعة الضوء فى الفراغ .

مختلفين من مجموعة إسناد بحيث يكون موضعاً «خاصاً» لعقربى إحدى الساعتين «آنياً» (بالمعنى السابق) مع «نفس» موضع عقربى الساعة الأخرى تكون «القراءات» «المتماثلة» للساعتين آنية دائماً (بمعنى التعريف السابق للآنية) .

الفصل التاسع

نسبية الآنية

لقد درجنا حتى الآن على إتخاذ طريق السكة الحديدية مجموعة إسناد لنا ولا بأس أن نفرض أن قطاراً طويلا جداً يتحرك على القضبان بسرعة قدرها ع فى الإتجاه الموضح بالشكل (أ) سيفضل المسافرون بهذا القطار اتخاذه مجموعة إسناد (مجموعة إحداثيات) وسيسندون كل ما يحدث إليه وعلى ذلك فكل حادثة تحدث على طول الطريق تحدث أيضا عند نقطة



(شكل ١)

خاصة من القطار كذلك . ويمكن أيضا أن نحدد الآنية بالنسبة إلى القطار بنفس الطريقة التى نحددها بها بالنسبة إلى طريقة السكة الحديدية . ويجابهنا السؤال التالى نتيجة طبيعية لما تقدم :

هل تكون الحادثتان الآنيتان بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية

(مثل الصاعقتين أ ، ب) آنيتين أيضا بالنسبة إلى القطار ؟ وسنوضح مباشرة فيمايلى أن الإجابة على هذا السؤال يجب أن تكون بالنفى .

إننا حينما نقول إن الصاعقتين أ ، ب آنيتان بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية نعنى أن أشعة الضوء الصادرة من المكانين أ ، ب حيث تحدث الصاعقتان تتقابل فى النقطة (و) (وهى منتصف المسافة أ ، ب على الطريق) ويناظر الحادثتان أيضاً على طريق السكة الحديدية الموضعين أَ ، بَ على القطار ولنفرض أن النقطة (وَ) هى نفس نقطة الوسط للمسافة أَ بَ على القطار فإنه عندما يحدث وميض البرق[1] تتفق النقطة (و) مع النقطة (وَ) لكنها كما فى الرسم التوضيحى تتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها ع هى سرعة القطار فإذا كان هناك راصد يجلس فى (وَ) فى القطار ولا يتحرك بالسرعة ع فإنه سيظل دائماً فى (و) وسيصل إليه شعاعا الضوء الصادران من أ ، ب فى نفس الوقت حيث يلتقيان عند مكان جلوسه ولكنه فى الواقع (بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية) يندفع فى اتجاه شعاع الضوء الآتى من ب بينما يبتعد عن الشعاع الآتى من أ وعلى ذلك سيرى الراصد الشعاع الآتى من ب قبل أن يرى الشعاع الآتى من أ وعلى ذلك نصل إلى النتيجة المهمة التالية :

---

(١) كما يظهر من طريق السكة الحديدية .

إن الحوادث الانية بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ليست آنية بالنسبة إلى القطار والعكس بالعكس (نسبية الآنية) فلكل مجموعة إسناد (مجموعة إحداثيات) زمنها الخاص . وما لم نعين مجموعة الإسناد التى حددنا بالنسبة لها زمن أية حادثة فليس هناك أى معنى لهذا التحديد .

وقبل ظهور نظرية النسبية كانت الفيزياء تسلم تسليما أعمى بأن الزمن أمر مطلق أى أنه مستقل عن حالة الحركة أو السكون التى عليها مجموعة الإسناد . ولقد رأينا الآن أن هذا الزعم لا يتفق مع تصور الآنية الطبيعى جداً وإذا أسقطناه اختفى التناقض الظاهرى بين قانون انتشار الضوء فى الفراغ ومبدأ النسبية (كما أوضحنا فى الفصل السابع) .

ولقد أوقعتنا الاعتبارات التى استعرضناها فى الفصل الثالث (وهى اعتبارات بالية لا يمكن التمسك بها) فى هذا التناقض ؛ فقد ذكرنا فى ذلك الفصل أن الرجل الذى يقطع وهو فى العربة المسافة ف بالنسبة للعربة يقطع نفس المسافة فى نفس المدة بالنسبة إلى قضيب السكة الحديدية . وها نحن نرى فى ضوء ما ذكر فى الفصل الحالى أن الزمن الذى تستغرقه حادثة ما بالنسبة إلى عربة القطار لا يجوز أن يعتبر مساوياً للزمن الذى تستغرقه نفس الحادثة بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ،

وعلى ذلك لا يمكن ان نوافق على ان الرجل حينما يمشى فى العربه ويقطع بالنسبة لها المسافة ف « فى الثانية » يقطع نفس المسافة فى زمن مساو بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية .

وفوق ذلك فإن اعتبارات الفصل السادس تعتمد على زعم آخر يبدو عند التحليل الدقيق حكماً تعسفيا ولو أننا كنا نلجأ إليه ضمنياً بصورة مستمرة حتى قبل مجىء نظرية النسبية .

الفصل العاشر

حول نسبية تصور المسافة

دعنا نتخيل نقطتين معينتين على القطار (مثل منتصف العربة الأولى ومنتصف العربة العشرين) الذى يتحرك على قضيب السكة الحديدية بسرعة ع . ودعنا نبحث عن المسافة التى تفصلهما . إننا نعلم مقدماً أنه يجب علينا أن نحصل على مجموعة إسناد نقيس المسافات بالنسبة إليها . وأبسط الأمور هو أن نعتبر القطار نفسه مجموعة الإسناد (مجموعة إحداثيات) والمسافر فى القطار يستطيع أن يقيس المسافة باستعمال قضيب القياس فى خط مستقيم (أى بتطبيقه على أرضية العربات العدد الكافى من المرات للوصول من النقطة الأولى إلى الثانية) ويحدد العدد الدال على عدد مرات تطبيق قضيب القياس طول المسافة المطلوبة .

ولكن الأمر يختلف عن ذلك إذا أردنا قياس هذه المسافة بالنسبة إلى طريق السكة الحديدية ويبدو هنا أن الطريقة المثالية لذلك هى : إذا سمينا أ ، ب النقطتين اللتين على القطار الذى يتحرك بالسرعة ع واللتين يراد إيجاد المسافة التى تفصل بينهما فإن هاتين النقطتين تتحركان على طول

الطريق بالسرعة ع أيضا ونحن نحتاج أولا إلى أن نعين النقطتين أ ، ب على طريق السكة الحديدية التى مرت عليهما النقطتان أ ، ب على القطار فى زمن معين ز بالنسبة إلى الطريق . وهاتان النقطتان (أَ ، بَ) على الطريق الحديدى يمكن تحديدهما تبعاً لتعريف الزمن الذى قدمناه فى الفصل الثامن والمسافة بين هاتين النقطتين (أَ ، بَ) يمكن أن تقاس إذاً بتكرار عملية تطبيق قضيب القياس على طول الطريق .

وليس هناك أى سبب أولى لأن نؤكد أن عملية القياس الأخيرة تتفق فى النتيجة مع عملية القياس الأولى . وهكذا قد يكون طول القطار مقيساً بالنسبة إلى الطريق مختلفاً عن طوله مقيساً بالنسبة إلى القطار نفسه . وهذا الظرف يؤدى بنا إلى إعتراض ثان على آراء الفصل السادس التى تبدو ظاهرياً واضحة ، وهو أنه إذا كان الرجل الذى فى العربة يقطع المسافة ف (مقيسة بالنسبة إلى القطار) فى وحدة الزمن فإن هذه المسافة (مقيسة بالنسبة إلى الطريق) ليست بالضرورة متساوية مع ف .

الفصل الحادى عشر
تحويـــــل لورنتـــز

إذا استـعرضنا نتـائج ثلاثة الفصول الأخـيرة نرى أن عـدم التوافق الظاهرى الذى نجده بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية (الفصل السابع) نشأ عـن التسليـم فـى الميكانيكا الكلاسيكية بفرضين لم يقم عليـهما أى دليل . وهذان الفرضان هما :

١ - الفتـرة الزمانية (الزمن) التى تفصـل بين حادثتين مستـقلة عن حالة الحركة التى عليها مجموعة الإسناد التى نرجع إليها .

٢ - الفترة المكانية (المسافة) بين نقطـتين على جسم جاسىء مستقلة عن حالة الحركة التى عليها مجموعة الإسناد التى نرجع إليها .

فإذا أسقطنا هذين الفرضين اختـفت مشكلة الفصل السابع لأن نظرية محصلة السرعات التى استنتجناها فى الفصل السادس تصبح خطأ . وعند ذلك يبدو أن قـانون انتشـار الضوء فى الفراغ قـد يكون متـفقاً مع مـبدأ النسبية . ويصبح المطلوب معرفـته هو كيف يجب تعديل الاعتبارات التى أوضحـناها فى الفصل السـادس حتى نزيل الـتناقض الظاهرى بين هاتين النتيجتين التجريبيتين الأساسيتين ؟ وهذا السؤال يقودنا إلى سؤال أعم فقد

كان لدينا فى الفصل السادس أمكنة وأزمنة مسندة إلى كل من القطار والطريق الحديدى فكيف نجد زمن ومكان حادثة بالنسبة إلى القطار إذا كنا نعرف مكانها وزمانها بالنسبة إلى الطريق الحديدى . . ؟ هل من المستطاع الإجابة على هذا السؤال بحيث لا يتعارض قانون انتشار الضوء فى الفراغ مع مبدأ النسبية ؟ أو بعبارة أخرى هل من الممكن إيجاد علاقة بين زمان ومكان الحادثة الواحدة بالنسبة إلى كلتا مجموعتى الإسناد بحيث يكون لكل شعاع من أشعة الضوء السرعة حـ بالنسبة إلى القطار والطريق معاً ؟ إن الإجابة على هذا السؤال هى بالإيجاب وهى إجابة محددة جداً يعبر عنها قانون محدد لتحويل المقادير الزمكانية للحادثة الواحدة تبعاً لتغير مجموعة الإسناد التى تسند إليها .

وقبل أن نتعرض لهذا الموضوع دعنا نقدم له بمايلى :

لقد وجهنا اهتمامنا حتى الآن إلى الحوادث التى تحدث على الطريق الحديدى والتى اعتبرت رياضياً على خط مستقيم وبالطريقة التى أوضحناها فى الفصل الثانى نستطيع أن نتخيل أن هذا المسند إليه مزود جانبيا ورأسياً بهيكل من قضبان القياس المتعامدة بحيث يمكن تحديد مكان أية حادثة بالنسبة إلى هذا الهيكل . وبالمثل فإننا نستطيع أن نتخيل القطار الذى يتحرك بالسرعة ع مستمراً فى كل الفضاء بحيث يمكن تحديد مكان أية حادثة مهما كانت بعيدة بالنسبة لهذا الهيكل الثانى ، ونستطيع دون أن نرتكب أى خطأ أساسى أن نتجاوز عن تداخل هذه الهياكل باستمرار معاً حيث أن الأجسام الجاسئة لا تتداخل فيما بينها .

وفى كل هيكل من هذه الهياكل نتخيل ثلاثة سطوح متعامدة على بعضها البعض تسمى مستويات إحداثية (مجموعة إحداثيات) وعلى ذلك يمثل الطريق الحديدى مجموعة الإحداثيات م وأية حادثة أينما تحدث يمكن تحديد مكانها بالنسبة إلى م بوساطة ثلاثة أعمدة س ، ص ، ش على المستويات الإحداثية وبالنسبة للزمن بالقيمة الزمنية ز أما بالنسبة إلى مَ فيحدد مكان نفس الحادثة وزمانها القيم سَ ، صَ ، شَ ، زَ المقابلة وهى تختلف عن س ، ص ، ش ، ز وقد أوضحنا بالتفصيل فيما تقدم كيف يجب أن نعتبر هذه المقادير نتائج للقياس الفيزيائى .

من الواضح أننا نستطيع أن نضع المشكلة على النحو الآتى :

ماهى قيم المقادير سَ ، صَ ، شَ ، زَ لحادثة ما بالنسبة إلى مَ إذا كنا نعلم قيم المقادير س ، ص ، ش ، ز لنفس الحادثة بالنسبة إلى م . . . ؟ ويجب أن نختار العلاقات بين هذه القيم بحيث تحترم قانون انتشار الضوء فى الفراغ بالنسبة إلى م ، مَ وبالرجوع إلى الوضع الموضح فى (الشكل ٢) لمجموع الإحداثيات نجد أن حل المشكلة تقدمه المعادلة :

$$\text{سَ} = \frac{\text{س} - \text{ع ز}}{\sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{حـ}^2}}}$$

$$\text{ص}' = \text{ص}$$

$$\text{ش}' = \text{ش}$$

$$\text{ز}' = \frac{\text{ز} = \frac{\text{ع}}{\text{حـ}^{2}}\,\text{س}}{\sqrt{1 - \frac{\text{ع}^{2}}{\text{حـ}^{2}}}}$$

(شكل ٢)

وتعرف هذه المجموعة من المعادلات بتحويل لورنتز ولو جعلنا أساساً لنا بدلا من قانون انتشار الضوء تلك المزاعم الضمنية التى كانت تركن إليها الميكانيكا قديماً والتى ترتكز على فكرة الطابع المطلق للأزمنة والأطوال لحصلنا بدلا من المعادلات السابقة على المعادلات التالية :

$$س' = س - ع ز$$

$$ص' = ص$$

$$ش' = ش$$

$$ز' = ز$$

وتسمى غالباً هذه المجموعة الأخيرة من المعادلات **بتحويل** جاليليو. ويمكننا الحصول على تحويل **جاليليو** من تحويل **لورنتز**، إذا عوضنا عن سرعة الضوء حـ في التحويل الأخير (تحويل لورنتز) بكمية متناهية الكبر .

وفيمايلى تستطيع أن ترى فوراً أن قانون انتشار الضوء في الفراغ تبعاً لتحويل **لورنتز** واحد بالنسبة لكل من مجموعة الإسناد م ومجموعة الإسناد م' . ولذلك نرسل إشارة ضوئية على طول المحور الإيجابى س وهذا المؤثر الضوئى يتقدم تبعاً للمعادلة : $س = حـ ز'$

أى بسرعة الضوء حـ وتبعاً لمعادلات تحويل لورنتز نرى أن هذه العلاقة البسيطة بين س ، ز تعنى علاقة بين س' ، ز' ونحن في الواقع إذا عوضنا عن س بالمقدار حـ ز في المعادلة الأولى والمعادلة الرابعة من معادلات تحويل لورنتز حصلنا على :

$$س' = \frac{ز (حـ - ع)}{\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}} ،$$

$$\text{زَ} = \frac{\text{ز} \left(1 - \frac{\text{ع}}{\text{حـ}} \right)}{\sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{حـ}^2}}}$$

ومنها نحصل بالقسمة على المعادلة :

$$\text{سً} = \text{حـ}\ \text{زَ}$$

وإذا أسندنا إلى المجموعة مَ يحدث انتشار الضوء تبعاً لهذه المعادلة . وهكذا نرى أن سرعة انتشار الضوء بالنسبة إلى المجموعة مَ تساوى أيضا حـ ونحصل على نفس النتيجة لأشعة الضوء التي تنتشر فى أى اتجاه كان . وطبعا ليس فى هذا أى غرابة حيث إن معادلات تحويل لورنتز قد اشتقت وفقاً لهذا الرأى .

الفصل الثانى عشر

سلوك الساعات وقضبان القياس المتحركة

هب أننى أضع قضيباً طوله متر فى اتجاه المحور سَ لمجموعة الإحداثيات مَ بحيث يتفق أحد طرفيه (البداية) مع نقطة الصفر بينما يتفق الطرف الثانى (النهاية) مع النقطة سَ = ١ فما طول هذا القضيب بالنسبة إلى م ؟ وحتى نحصل على ذلك ما علينا إلا أن نبحث أين يقع مبدأ القضيب ونهايته بالنسبة إلى م عند الزمن ز الخاص بالمجموعة م وبوساطة المعادلة الأولى من تحويل لورنتز نجد أن قيمة هاتين النقطتين عند الزمن ز = صفر يمكن إثبات أنها :

$$\text{س (ابتداء القضيب)} = \text{صفر} \sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}} = \text{صفر}$$

$$\text{س (نهاية القضيب)} = ١ \sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}$$

وتكون المسافة بين النقطتين هى $\sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}$ ولكن قضيب القياس يتحرك بالسرعة ع بالنسبة إلى م وعلى ذلك نجد أن طول قضيب قياس

جاسيء طوله متر يتحرك في اتجاه طوله بسرعة قدرها ع هو $\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}$ من المتر وهكذا يكون القضيب الجاسيء أقصر فى حالة الحركة منه فى حالة السكون ، وكلما زادت سرعة حركته زاد قصره بحيث إذا بلغت السرعة

ع = حـ يصبح طوله $\left(\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}\right)$ = صفر وعند السرعات الأكبر

من حـ يصبح الجذر التربيعى خيالياً . ومن هذا نستنتج أن السرعة حـ فى نظرية النسبية تلعب دور السرعة القصوى التى لا يمكن أن يبلغها أو يزيد عنها أى جسم حقيقى .

وواضح بالطبع أن هذا المظهر للسرعة حـ كسرعة قصوى جاء نتيجة لمعادلات تحويل لورنتز لأنها تصبح لا معنى لها إذا اخترنا قيماً للسرعة أكبر من حـ وعلى العكس لو أننا تأملنا قضيب قياس طوله متر فى حالة سكون وفى المحور (س) بالنسبة إلى م لوجدنا أن طوله بالنسبة إلى راصد

فى مَ سيكون $\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}$ وهذا متفق تماماً مع مبدأ النسبية وهو أساس تأملاتنا .

وواضح بداهة أن معادلات التحويل تهيىء لنا حتما فرصة معرفة الشيء الكثير عن السلوك الفيزيائى لكل من قضبان القياس والساعات لأن المقادير س . ص . ش . ز ليست إلا نتائج قياسات لا أكثر ولا أقل

يمكن الحصول عليها عن طريق قضبان القياس والساعات . ولو أننا جعلنا أساساً لتفكيرنا التحويل الجاليلى لما حصلنا على انكماش القضيب نتيجة لحركته .

دعنا الآن نتأمل ساعة موضوعة دائما عند أصل مَ (س = صفر) ، ز = صفر ، زَ = ١ هما دقتان متتاليتان لهذه الساعة والمعادلتان الأولى والرابعة من تحويل لورنتز تعطيانا لهاتين الدقتين :

ز = صفر

$$ز = \frac{١}{\sqrt{١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢}}}$$

وكما يبدو من م تتحرك الساعة بالسرعة ع وعلى ذلك تكون فترة الزمن بين الدقتين بالنسبة إلى م ليست ثانية ولكن $١ = \frac{١}{\sqrt{١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢}}}$

من الثوانى أى زمناً أكثر قليلا وعلى ذلك تكون الساعة أبطأ فى حالة الحركة منها فى حالة السكون . وهنا أيضاً تلعب السرعة حـ دور السرعة القصوى التى لا يمكن بلوغها .

الفصل الثالث عشر
نظرية محصلة السرعات
تجربة فيزو

إننا فى الحياة العملية لا نحرك الساعات وقضبان القياس إلا بسرعات ضئيلة إذا ما قورنت بسرعة الضوء وعلى ذلك لن نستطيع أن نتحقق من نتائج الفصل السابق عملياً . ومع ذلك لابد أنه قد لفت نظرك غرابة هذه النتائج ولهذا يسرنا أن نستخلص من النظرية تبعاً لما أوضحناه فى الفصل السابق نتيجة قد تم التحقق منها عملياً بصورة شائقة . لقد اشتققنا فى الفصل السادس نظرية محصلة السرعات فى اتجاه واحد على النحو الذى تتبعه الميكانيكا الكلاسيكية ويمكن استنتاج هذه النظرية أيضا من تحويل جاليليو (الفصل الحادى عشر) فبدلا من الرجل الذى يمشى فى عربة القطار نتصور نقطة تتحرك بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات مَ حسب المعادلة :

$$سَ = ع زَ$$

وبوساطة المعادلة الأولى والرابعة من تحويل جاليليو يمكننا التعبير عن سَ ، زَ بدلالة س ، ز عندئذ نحصل على المعادلة س = (ع+ غ) ز .

وهذه المعادلة لا تعبر عن شئ سوى قانون حركة النقطة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م (أو الرجل بالنسبة إلى الطريق الحديدية) وسنرمز إلى هذه السرعة بالرمز عـ وحينئذ نحصل كما فى الفصل السادس على :

$$\text{عـ} = (\text{ع} + \text{غ}) \qquad \text{(أ)}$$

ولكننا نستطيع أن نجرى العملية نفسها على أساس نظرية النسبية عند ذلك يجب علينا ن نعبر عن سَ ، زَ فى المعادلة :

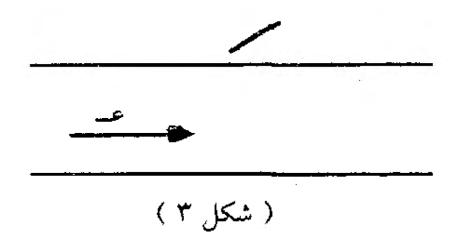
$$\text{سَ} = \text{غَ}\ \text{زَ}$$

بدلالة س ، ز وباستعمال المعادلتين الأولى والرابعة من تحويل لورنتز نحصل بدلا من المعادلة (أ) على المعادلة :

$$\text{عـ} = \frac{\text{ع} + \text{غ}}{1 + \frac{\text{ع غ}}{\text{حـ}^2}} \qquad \text{(ب)}$$

وهو ما يناظر محصلة السرعات فى اتجاه واحد تبعاً لنظرية النسبية . والسؤال الذى يجابهنا الآن هو : أى هاتين النظريتين أكثر اتفاقاً مع التجربة . . . ؟ وفى هذا الموقف تسعفنا وتشد أزرنا تجربة على جانب عظيم من الأهمية أجراها الفيزيائى القدير فيزو منذ أكثر من نصف قرن وأعاد إجراءها منذ ذلك الحين عدد من أحسن الفيزيائيين التجريبيين حتى أصبحت نتيجتها لا يتطرق إليها شك على الإطلاق . والتجربة تدور

حول المسألة التالية : إن الضوء ينتقل فى سائل ساكن بالسرعة فبأية سرعة ينتقل فى اتجاه السهم فى الأنبوبة (انظر الشكل ٣) إذا كان السائل المذكور عالية يندفع هو نفسه فى الأنبوبة بالسرعة ع . . . ؟



(شكل ٣)

سيكون علينا تمشياً مع مبدأ النسبية أن نسلم بأن انتشار الضوء سيحدث دائماً بنفس السرعة غ بالنسبة للسائل سواء أكان هذا السائل يتحرك بالنسبة للأجسام الأخرى أم لا وهكذا تصبح سرعة الضوء بالنسبة إلى السائل معروفة وسرعة السائل بالنسبة إلى الأنبوبة معروفة أيضاً ونريد معرفة سرعة الضوء بالنسبة إلى الأنبوبة .

وواضح أن المشكلة التى أمامنا الآن هى نفس مشكلة الفصل السادس حيث تلعب الأنبوبة دور الطريق الحديدية أو مجموعة الإسناد مَ وأخيراً سنجد أن الضوء يلعب دور الرجل الذى كان يمشى بطول العربة . فإذا رمزنا إلى سرعة الضوء بالنسبة إلى الأنبوبة بالرمز ع فإننا يمكن أن نحصل عليها من المعادلتين أ ، ب الأولى باستعمال تحويل جاليليو والثانية باستعمال تحويل لورنتز فأى الجوابين هو الصحيح ؟ ولقد جاءت

التجربة فى جانب المعادلة[1] المشتقة من نظرية النسبية والاتفاق بينهما تام جداً ، وتبعاً لأدق القياسات التى قام بها زيمان تعبر المعادلة عن تأثير سرعة جريان السائل غ على انتقال الضوء إلى تقريب يقرب من ١٪ .

ومع ذلك يجب أن لا يفوتنا الآن التنبيه إلى أن نظرية تفسر هذه الظاهرة كان قد سبق أن قدمها هـ. أ . لورنتز قبل مجىء نظرية النسبية بوقت طويل ، ولكن نظرينه وكانت ديناميكية كهربية بحتة فى طبيعتها كان قد حصل عليها بالالتجاء إلى فروض أخرى حول البناء الكهرومغناطيسى للمادة . وهذا الوضع مع ذلك لا يقلل أبداً من نتيجة التجربة كاختبار مهم يؤيد نظرية النسبية لأن الديناميكا الكهربية التى وضعها ماسكويل لورنتز والتى قامت على أساسها النظرية الأولى لتفسير التجربة لا تتعارض بأى شكل مع نظرية النسبية ، بل إن هذه الأخيرة قد نبعت من الدنياميكا الكهربية كنظرية تجمع وتعمم بطريقة مذهلة الافتراضين اللذين بنيت عليهما الديناميكا الكهربية واللذين كانا قبل ذلك مستقلين الواحد عن الأخر .

---

(١) لقد وجد فيزو أن $\text{عـ} = \text{ع} + \text{غ} \left(1 + \frac{1}{\text{ن}^2} \right)$ حيث $\text{ن} = \frac{\text{حـ}}{\text{ع}}$ وهو معامل انكسار السائل ومن الناحية الأخري بالنسبة إلى صغر $\frac{\text{ع غ}}{\text{ح}^2}$ مقارنة بالواحد الصحيح يمكن أن تستبدل (ب) أولا بالمقدار $\text{عـ} = (\text{ع} + \text{غ}) \left(1 - \frac{\text{ع غ}}{\text{ح}^2} \right)$ أو إلى نفس درجة التقريب بالمقدار : $\text{ع} + \text{غ} \left(1 + \frac{1}{\text{ن}^2} \right)$ وهى تتفق ونتيجة فيزو .

الفصل الرابع عشر
القيمة الكاشفة للنظرية النسبية

نستطيع أن نلخص سلسلة أفكارنا السابقة فيمايلى : لقد أدت بنا التجربة إلى الاقتناع بأمرين : صدق مبدأ النسبية من ناحية وأن سرعة انتقال الضوء فى الفراغ يجب اعتبارها مقداراً ثابتاً من الناحية الأخرى ، وبإتخاذ هذين الفرضين الأساسيين حصلنا على قانون تحويل الإحداثيات المتعامدة س . ص . ش والزمن ز للحوادث - وهى لب جميع العمليات الطبيعية - وفى هذه الحالة لم نحصل على تحويل جاليليو ولكننا حصلنا بخلاف الحال فى الميكانيكا الكلاسيكية على تحويل لورنتز .

ولقد لعب قانون انتشار الضوء وصحته واضحة للعيان دوراً هاماً فى الوصول إلى هذه النتيجة ومادام لدينا تحويل لورنتز فإننا نستطيع أن نجمع بينه وبين مبدأ النسبية لنحصل على النظرية على النحو التالى :

« يجب أن تكون القوانين الطبيعية العامة بحيث لا تتغير إذا استبدلت المتغيرات س . ص . ش . ز المتعلقة بمجموعة الإحداثيات الأصلية م بالمتغيرات سَ . صَ . شَ . زَ الخاصة بمجموعة الإسناد مَ وفى هذه الحالة يحدد العلاقة بين المتغيرات الأولى والثانية تحويلات لورنتز أو

أو بعبارة أخرى مختصرة يجب أن تكون القوانين الطبيعية متغيرات متعدية بالنسبة إلى تحويلات لورنتز » .

هذا هو الشرط الرياضى المحدد الذى تستوجبه نظرية النسبية فى أى قانون طبيعى . ولذلك أصبح للنظرية أثر كاشف عميق فى البحث عن القوانين الطبيعية العامة . فإذا وجد أن قانوناً عاماً من قوانين الطبيعة لا يحقق هذا الشرط فعلى الأقل لابد أن يكون أحد الفرضين الأساسيين للنظرية خاطئاً . والآن دعنا نرى النتائج العامة التى أدت إليها هذه النظرية .

الفصل الخامس عشر

النتائج العامة للنظرية

اتضح فى سياق ما تقدم أن نظرية النسبية الخاصة قد تبلورت من دراسة الضوء والديناميكا الكهربائية وهى لم تغير النتائج النظرية فى هذين المجالين ولكنها بسّطت إلى حد بعيد البناء النظرى - أى اشتقاق القوانين - والأهم من ذلك بمراحل أنها اختصرت إلى حد بعيد عدد الفروض المستقلة التى كانت تستند إليها وتقوم عليها وجهة النظر السابقة . ولقد جعلت نظرية النسبية الخاصة نظرية ماكسويل لورنتز مرضية بشكل جعل علماء الفيزياء على استعداد لقبولها ولو لم تكن جميع التجارب قد وقفت فى صفها وأيدتها تأييداً كاملا .

واحتاج الأمر إلى تعديل الميكانيكا الكلاسيكية حتى تتفق مع نظرية النسبية الخاصة . ولم تؤثر هذه التعديلات تأثيراً جوهرياً إلا فى القوانين التى تتعلق بالسرعات الكبيرة أى عندما تقترب سرعة الأجسام المتحركة من سرعة الضوء حـ . وليس لدينا مثال لهذه السرعات إلا ما يتعلق بالإلكترونيات والأيونات أما بالنسبة للسرعات الأخرى فقد كان الاختلاف بين نتائج قوانين الميكانيكا الكلاسيكية ونتائج نظرية النسبية الخاصة أضأل

من أن يظهر عملياً وسوف لا نتــعرض لحركة النجوم إلى أن ندرس نظرية النسبية العامة . إن طاقة الحركة لنقطة مادية تتحرك لم يعد يحددها المقدار المعروف ك $\frac{ع^2}{2}$ بل يعبر عنها بالتعبير :

$$\frac{ك\ حـ^2}{\sqrt{1 - \frac{ع^2}{حـ^2}}}$$

وهذا المقدار يقتــرب من مالا نهاية كلما اقتربت الســرعة ع من سرعة الضوء حـ ، وعلى ذلك يجب أن تظل السرعــة دائما أقل من حـ مهــما كبرت العــجلة وإذا وضعنا التعبــير عن طاقة الحركة على شكــل متسلسلة حصلنا على :

$$ك\ حـ^2 + ك\ \frac{ع^2}{2} + \frac{3}{8}\ ك\ \frac{ع^2}{حـ^2} + \ldots$$

عندما يكون الحد $\frac{ع^2}{حـ^2}$ صغيراً مقــارناً بالواحد الصحيح فإن الثالث من هذه الحدود يكون دائماً صغيراً مــقارناً بالحد الثانى ، وهذا الأخير هو الذى يوضع وحده موضع الاعتبار فى الميكانيكا الكلاسيكية . والحد الأول **ك** $حـ^2$ لا يتضمن السرعة وليس هنــاك محل للنظر إليه الآن إذا كان ما يعنينا هو مسألة كيفية اعــتماد طاقة النقطة المادية على السرعة وسنتكلم عن

المعنى الأساسى لذلك الحد فيما بعد .

وأهم النتائج ذات الطابع العام التى أدت إليها نظرية النسبية الخاصة تتعلق بفكرة الكتلة ؛ فقبل مجئ النسبية كانت الفيزياء تسلم بقانونى بقاء لهما أهمية أساسية هما قانون بقاء الطاقة وقانون بقاء الكتلة . وكان هذان القانونان يبدوان مستقلين عن بعضهما البعض تماماً . ولكنهما عن طريق نظرية النسبية قد ادمجا فى قانون واحد وسنرى فيمايلى باختصار كيف تم هذا التوحيد وأى معنى يحمله ذلك فى طياته .

إن مبدأ النسبية يتطلب أن يكون بقاء الطاقة صحيحاً لا بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات وحدها بل أيضا إلى كل مجموعة إحداثيات مَ فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة إلى المجموعة م أو باختصار بالنسبة إلى كل مجموعة إسناد جاليلية . ويتطلب أيضاً وذلك على عكس ما فى الميكانيكا الكلاسيكية أن يكون تحويل لورنتز هو العامل الحاسم فى الانتقال من مجموعة كهذه إلى أخرى .

وبقليل من التأمل البسيط نسبياً نجد أننا نصل إلى النتيجة التالية من هذه المقدمات ، وذلك متفق مع المعادلات الأساسية للديناميكا الكهربية لماكسويل : إذا امتص جسم يتحرك بالسرعة ع مقداراً من الطاقة ق[1] على شكل إشعاع دون أن يحدث نتيجة لذلك أى تغيير فى سرعته فإن طاقته تزيد نتيجة لذلك بالمقدار :

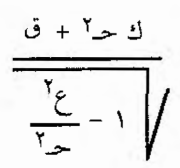
(١) ق هى الطاقة المستمدة كما تبدو بالنسبة إلى مجموعة اسناد تتحرك مع الجسم .



وبتأمل التعــبير الذى قدمناه آنفـاً لطاقة الحركة للجــسم نجد أن طاقة الحركة المطلوبة للجسم تصبح :

$$\frac{\left[ك + \frac{ق}{حـ^{٢}} \right] حـ^{٢}}{\sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}}$$

وهكذا تصبح للجــسم نفس الطاقة التى لجسم كـتلته $\left[ك + \frac{ق}{حـ^{٢}} \right]$ ويتحرك بالسـرعة ع . من هنا يمكن أن نقول : إذا اكتسب جسـم قدراً من الطاقة ق فـإن كتلته القصـورية تزيد بالمقدار $\frac{ق}{حـ^{٢}}$ وليست كتلة الـقصور لجسم ما ثابتـة بل تتغيرتبعـاً لتغير طاقـة الجسـم . بل يمكن أن نقول أن كتلة قصور مجموعة من الأجسـام يمكن أن تعتبر دليلا على مقدار طاقتها . وعلى ذلك يصبح قانون بقـاء كتلة مجموعة ما مطابقـا لقانون بقاء الطاقة للمجموعة نفسهـا . وهو صحيح مادامت المجموعة لا تمتص ولا تشع أية طاقة . وإذا عبرنا عن الطاقة بالتعبير :



وجدنا أن الحــد ك $\text{حـ}^{٢}$ الذى لفت نظرنا من قــبل ليس إلا مقــدار الطاقة[1] التى يملكها الجسم قبل أن يمتص **ق** .

وليس من المستطاع حالياً المقارنة المباشــرة بالتجربة لهذه العلاقة (كان ذلك صــحيــحاً سنــة ١٩٢٠ ولكن انظر التعلــيق فى أخر هذا الفــصل) بالنسبة لأن تغيرات الطاقة **ق** التى يمكن أن تعرض لها مجموعة ما ليست كبيــرة بالحد الكافى لأن تجعل نفــسها محــسوسة كتغــيير فى كتلــة قصور المجمــوعة حيث أن $\frac{\text{ق}}{\text{حـ}^{٢}}$ مـقدار صغـير جداً بالمقــارنة بالكتلة **ك** التى كــانت موجــودة قبل تغــير الطاقــة، ولهذا الســبب اســتطاعت الميكانيكا الكلاسيكيــة بنجاح أن تعتــبر قانون بقاء الكتلــة قانوناً صحيــحاً مستــقلا بذاته .

ودعنى أضيف إلــى ما تقدم مــلاحظة أخيرة أســاسيــة الجوهر . إن النجاح الذى حققته تفسيرات فــرداى - ماكسويل للتأثير الكهرومغناطيسى عن بعد قــد جعلت الفيزيائيين أكــثر اقتناعــا بأنه لا وجود لشىء من نوع «التأثير الفورى عن بعد » (أى الذى لا يتــضمن وسطاً بينهما) الذى نجده

---

(١) كما تبدو لمجموعة إحداثيات تتحرك مع الجسم .

فى قانون الجاذبية لنيوتن . وحسب نظرية النسبية يحل التأثير عن بعد بسرعة الضوء دائما محل التأثير الفورى أو التأثير عن بعد بسرعة انتشار لانهائية وهذا مرتبط بحقيقة أن السرعة حـ تلعب دوراً أساسياً فى النظرية. وفى الجزء الثانى من هذا الكتاب سنرى بأى شكل ستتعدل هذه النتيجة فى نظرية النسبية العامة .

تعليق :

مع تقدم عمليات التحويل النووية التى تنشأ من قذف العناصر بدقائق ألفا أو البروتونات أو أشعة جاما تأكدت علاقة تكافؤ الكتلة والطاقة حسب المعادلة ق = ك حـ٢ فمجموع الكتل المتبادلة التأثير مضافا إليه مكافىء الكتلة للطاقة الحركية للدقائق المقذوفة (الفوتون) أكبر دائما من مجموع الكتل الناتجة عن التحويل والفرق بينهما هو الكتلة المكافئة لطاقة الحركة للدقائق المتولدة أو الطاقة الكهرومغناطيسية المشعة (فوتونات جاما) . وبنفس الطريقة نجد أن كتلة الذرة المشعة التى تتحلل فجأة أكبر دائما من مجموع كتل الذرات الناشئة بمقدار الكتلة المكافئة لطاقة الحركة للدقائق المتولدة (أو الطاقة الفوتونية) وقياسات الطاقة المتولدة عن التفاعلات النووية هى ومعادلات هذه التفاعلات يجعلان من الممكن تقدير الأوزان الذرية بغاية الدقة .

الفصل السادس عشر
نظرية النسبية الخاصة والتجربة

إلى أى مدى تؤيد التجربة نظرية النسبية الخاصة . . . ؟ ليس من السهل الإجابة على هذا السؤال للسبب الذى سبق ذكره عند الكلام عن تجربة فيزو الأساسية . وكلنا نعلم أن نظرية النسبية الخاصة قد تبلورت من نظرية ماكسويل لورنتز عن الظواهر الكهرومغناطسية ، وتبعاً لذلك فإن كل الحقائق التى تؤيد هذه النظرية الأخيرة تؤيد نظرية النسبية . ولكنى أقتصر هنا على ذكر الحقيقة التالية وحدها نظراً لما لها من الأهمية البالغة .

إن نظرية النسبية تتيح لنا أن نعرف مقدما التأثيرات التى تتناول الضوء الآتى إلينا من النجوم الثابتة . ومن الممكن الوقوف على هذه التأثيرات بطريقة متناهية البساطة . وقد وجد أنها وهى راجعة إلى حركة الأرض بالنسبة لهذه النجوم الثابتة تتفق مع التجربة . ونحن نشير هنا إلى الحركة السنوية للموقع الظاهرى للنجوم الثابتة الناشيء عن دوران الأرض حول الشمس الزغ) وإلى تأثير المركبات القطرية لحركات النجوم الثابتة بالنسبة إلى الأرض على لون الضوء الذى يصل إلينا منها ، وهذا التأثير

الأخير عبارة عن انتقال طفيف فى خطوط الطيف فى الضوء المرسل من النجوم الثابتة إلينا إذا قورن بوضع نفس هذه الخطوط إذا كان مصدر الضوء على الأرض (ظاهرة دوبلر) . والبراهين التجريبية التى تؤيد نظرية مكسويل - لورنتز وتؤيد أيضا نظرية النسبية أكثر من أن تحصى هنا . وهى فى الحقيقة تحدد الإمكانيات النظرية بشكل لم تقو على الصمود أمامه غير نظرية ماكسويل لورنتز .

ولكن هناك مجموعتان من الحقائق التجريبية لا يمكن تطبيق نظرية ماكسويل لورنتز عليها إلا إذا أدخلنا على تلك النظرية - وذلك دون أن نلجأ إلى نظرية النسبية - فرضاً يبدو مفتعلا .

فمن المعروف أن أشعة المهبط وكذلك الأشعة المعروفة بأشعة بيتا التى تشعها المواد ذات الإشعاع كليهما تتكون من جسيمات صغيرة مشحونة بشحنة كهربية سالبة (إلكترونيات) لها قصور ذاتى صغير جداً وسرعة كبيرة جدا . وإذا درسنا انحراف هذه الإشعاعات تحت تأثير المجالات الكهربائية والمجالات المغناطيسية أمكننا أن نعرف بالضبط قانون حركتها .

وتواجهنا عند دراسة هذه الإلكترونيات نظرياً فى ضوء نظرية الديناميكا الكهربية مشكلة ناشئة عن عجز هذه النظرية نفسها عن تفسير طبيعة الإلكترونات . فلما كانت الكتل الكهربائية المتشابهة النوع تتنافر فيما بينها فإن الكتل الكهربائية السالبة التى تكون الإكترونات يجب أن

تتناثر بفعل تنافرها فيما بينها ما لم تكن واقعة تحت تأثير قوى من نوع آخر لم تتضح لنا حتى الآن[١] . فإذا فرضنا أن المسافات التى تفصل بين الكتل الكهربائية التى تكون الإلكترونات تظل ثابتة أثناء تحركها بالنسبة لبعضها البعض (اتصال جاسىء بالمعنى الميكانيكى الكلاسيكى) فإن القانون الذى نصل إليه معبراً عن حركة الإلكترون لا يتفق مع التجربة . ولقد كان لورنتز هو أول من افترض من وجهة نظر شكلية بحتة أن شكل الإلكترون يعانى انكماشا فى إتجاه حركته وأن كمية الانكماش تتناسب مع $\sqrt{1 - \frac{\text{ع}^{2}}{\text{ح}^{2}}}$ وهذا الفرض الذى لا تبرره أى حقائق الديناميكا الكهربية يمدنا بالقانون الخاص بحركة الإلكترون وهو القانون الذى حققته التجربة بدقة فائقة أخيراً .

ونظرية النسبية تؤدى إلى نفس قانون الحركة دون حاجة إلى أى افتراض آخر فيما يتعلق ببناء أو سلوك الإلكترون . وقد وصلنا إلى نتيجة مماثلة لهذا فى الفصل الثامن فيما يتعلق بتجربة فيزو التى تنبأت نظرية النسبية بنتيجة مطابقة لها دون حاجة إلى أى افتراض حول طبيعة السائل .

والمجموعة الثانية من الحقائق التى أشرنا إليها تتعلق بمسألة إمكان أو

---

(١) توضح نظرية النسبية العامة أن الكتل الكهربائية للاكترونات تتجمع معا تحت تأثير قوى الجذب .

استحالة جعل حركة الأرض فى الفضاء محسوسة بالتجربة على الأرض . لقد لاحظنا فى الفصل الخامس أن كل المحاولات التى أجريت لهذا الغرض كانت نتائجها سلبية . وقبل وضع نظرية النسبية لم يكن مستطاعاً إدراك سبب هذه السلبية لأن الأفكار الخاطئة التى توارثناها عن الزمان والمكان حالت بيننا وبين الشك فى قيمة التحويل الجاليلى فى حالة الانتقال من مجموعة إسناد إلى مجموعة إسناد أخرى . فإذا افترضنا أن معادلات ماكسويل لورنتز صحيحة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م مثلا وجدنا عند تطبيقها على مجموعة إسناد أخرى مَ تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة إلى م أنها غير مطابقة وذلك فى حالة افتراضنا أن علاقات التحويل الجاليلى بين إحداثيات مجموعة الإسناد م ومجموعة الاسناد مَ هى السائدة . وهكذا يبدو أنه من بين كل مجاميع الإسناد الجاليلية هناك مجموعة إسناد واحدة م تقابل حالة خاصة من الحركة تتميز عما عداها من المجموعات بحيث تبدو فريدة فى بابها . وقد فسر بعض العلماء هذا الأمر فيزيائيا بأن اعتبروا م فى حالة سكون بالنسبة «لأثير الفضاء» الذى تخيلوه وفرضوا وجوده فرضاً ، بينما اعتبروا من الناحية الأخرى كل مجموعات الإحداثيات مَ التى تتحرك بالنسبة إلى م فى حالة حركة بالنسبة لهذا الأثير. وقد نسبت إلى حركة مَ فى الأثير (دفع الأثير بالنسبة إلى مَ) أشد القوانين تعقيدا والتى كان يظن أنها تنطبق على مَ وبالتحديد استلزم الأمر أن نفترض دفع الأثير هذا قائما بالنسبة للأرض أيضاً . ولمدة طويلة وجه

علماء الفيزياء جهودهم صوب محاولة الاستدلال على هذا الدفع على سطح الأرض .

وفي إحدى هذه المحاولات ابتكر **ميكلسن** محاولة تبدو حاسمة إذ تصور مرآتين مثبتتين على جسم جاسيء بحيث يتقابل سطحاهما العاكسان (وجها لوجه) . يستغرق شعاع الضوء زمنا محدداً ليقطع المسافة بينهما ذهابا وإيابا إذا كان الجهاز ثابتا بالنسبة للأثير ولكن إذا كان الجهاز متحركا بالنسبة للأثير فقد وجد بالتقدير الحسابى أن الزمن زَ اللازم للعملية فى هذه الحالة يختلف قليلا عن الزمن ز ، وفوق ذلك فقد أظهر التقدير الحسابى أنه إذا كانت سرعة الجهاز ع بالنسبة للأثير فإن هذا الزمن زَ يختلف فى حالة ما إذا كان اتجاه حركة الجسم عمودياً على مستوى المرآتين عنه فى حالة ما إذا كان اتجاه حركته موازياً لهما . وبالرغم من أن الفرق بين هذين الزمنين ضئيل جداً فقد أجرى ميكلسن - مورلى تجربة على أساس التداخل الضوئى يمكن الاستدلال منها على ذلك الفرق . ومع كل جاءت نتيجة التجربة سلبية وكان هذا أمراً محيراً جداً لعلماء الفيزياء . وقد تغلب لورنتز وفتزجرالد على هذا الموقف المتأزم بأن افترضا أن حركة أى جسم بالنسبة للأثير تحدث انكماشاً فى الجسم فى اتجاه الحركة . وأن مقدار هذا الانكماش كاف لأن يعادل ذلك الفرق فى الزمن الذى أشرنا إليه آنفاً . وبمقارنة هذا بما جاء فى الفصل الثانى عشر نرى أنه من وجهة نظر النظرية النسبية كان هذا الحل للمشكلة هو الحل

الصحيح ولـكنه تم فى نظرية النسبية على أسـاس أسلم جداً ، فليس فى نظرية النسـبية شيء مـثل مجمـوعة الإحداثيـات المميـزة أو الفريدة التى استـوجبت فكرة الأثـير . وعلى ذلك فليس هناك دفع فى الأثيـر وليس هناك داع لأية تجربة للاستدلال عليه . إن انكماش الأجـسام المتحركة يتبع المبدأين الأساسيين للنظرية دون ما حاجة إلى اصطناع أى فروض خاص. والعامل الأول فى هذا الانكماش ليس هو الحركـة فى حد ذاتها فليس لها أى معنى مسـتقل إنما هو الحركة بالنـسبة إلى مجمـوعة الإسناد التى وقع عليها الاختيار وعلى ذلك فجهاز المرآة لميكلسن - مورلى لا يعانى إنكماشاً بالنسبة إلى مجموعة إسناد تتحرك على الأرض ولكنه ينكمش بالنسبة إلى مجموعة إسناد فى حالة سكون بالنسبة إلى الشمس .

الفصل السابع عشر

فضاء منكوفسكى رباعى الأبعاد

إن القراء من غير الرياضيين يتتابهم الفزع والرعب حينما يقرأون عن الأشياء الرباعية الأبعاد ، وهم يحسون عند ذلك إحساساً لا يختلف كثيراً عما يحسون به فى مواجهة السحر والسحرة . ومع ذلك فليس هناك قول أعم من أن العالم الذى نعيش فيه متصل زمانى مكانى رباعى الأبعاد .

إن المكان متصل ثلاثى الأبعاد ، ونعنى بهذا أننا نستطيع أن نحدد موضع النقطة الساكنة بوساطة ثلاثة أعداد (إحداثيات) س . ص . ش وأن هناك عدداً لا نهائياً من النقط المتجاورة يحدد موضع أياً منها الإحداثيات سَ . صَ . شَ يمكن أن تكون قريبة بأية درجة نختارها إلى الإحداثيات س . ص. ش الخاصة بالنقط الأولى ولهذا السبب نسميها المتصل . ونظراً لأن له إحداثيات ثلاثا فإننا نقول عنه إنه ثلاثى الأبعاد .

وبالمثل فإن دنيا الظواهر الطبيعية ويسميها منكوفسكى باختصار «العالم» طبيعى أن تكون رباعية الأبعاد بالمعنى الزمانى - المكانى لأنها تتكون من حوادث فردية يعين كل منها أربعة أعداد هى بالأسم ثلاثة

إحداثيات مكانية س ، ص ، ش وإحداثي زماني ز . والعالم بهذا المعنى متـصل لأنه توجد بالنسبـة لكل حادثة حوادث مـجاورة (واقعـية أو على الأقل يمكن تخـيلها) لا حـصر لهـا إحداثيـاتها سَ ، صَ ، شَ ، زَ . وتختلف بقدر ضئيل جداً عن إحداثيات الحادثة الأولى س ، ص ، ش ، ز أما كـوننا لم نتعود على النظر إلى الـعالم بهذا المعنى على أنه مـتصل رباعى الأبعـاد فذلك راجع إلى أن الزمـان كان يلعب فى الفـيزياء قـبل نظرية النسبية دوراً مـختلفاً أو أكثر استقـلالا إذا قورن بإحداثيات المكان، وهذا هو الأصل فى العادة الـتى جرينا عليهـا من اعتبـار الزمان متـصلا مستـقلا . وفى الواقع يعتـبر الزمن فى نظر الميكانيكا الكلاسيكيـة مطلقا بمعنى أنه مستقل عن موضع مجموعة الإسناد وحالتها من الحركة . ونرى تعبيراً عن هذا فى المعادلة الأخيرة من التحويل الجاليلى ز = زَ .

والنحـو الرباعى الأبعاد فى تصـور العـالم هو الموضع الطبيـعى فى نظرية النسبية حيث تجرد هذه النظرية الزمن من استقلاله . ويظهر هذا فى المعادلة الرابعة .

$$\text{زَ} = \frac{\text{ز} - \frac{\text{ع}}{\text{حـ}^{٢}}\,\text{س}}{\sqrt{١ - \frac{\text{ع}^{٢}}{\text{حـ}^{٢}}}}$$

وفوق ذلك فإن الفرق الزمنى ىٔ زَ لحادثتين بالنسبة إلى مَ لا يختفى عادة حتى ولو اختفى الفرق الزمنى ىٔ ز لنفس هاتين الحادثتين بالنسبة إلى م . إن الفاصل المكانى الخالص لحادثتين بالنسبة إلى م ينتج فاصلا زمنيا لنفس الحادثتين بالنسبة إلى مَ . وليس هذا هو أهم اكتشافات منكوفسكى ، إذ أن اكتشافه الأهم يكمن فى الحقيقة فى تسليمه بأن المتصل الزمانى - المكانى الرباعى الأبعاد بالنسبة للنظرية النسبية يشبه شبهاً بعيداً فى خواصه الشكلية الأساسية المتصل المكانى الثلاثى الأبعاد للهندسة الإقليدية[1] وما علينا لإظهار هذا الشبه إلا أن نستبدل إحداثى الزمن العادى ز بالكمية الخيالية $\sqrt{-1}$ حـ ز المتناسبة معه . وبهذا تأخذ القوانين الطبيعية التى تطابق نظرية النسبية الخاصة الشكل الرياضى الذى يلعب فيه إحداثى الزمن نفس دور إحداثيات المكان الثلاث . وتناظر هذه الإحداثيات الأربع من حيث الشكل إحداثيات الهندسة الإقليدية المكانية الثلاث . ويجب أن يكون واضحاً حتى لغير الرياضيين أنه نتيجة لهذه الإضافة الشكلية البحتة إلى معلوماتنا اكتسبت النظرية بالطبع وضوحاً لاحد له .

إن هذه الملاحظات العابرة يمكن أن تعطى القارئ صورة ما عن الفكرة الهامة التى ساهم بها منكوفسكى والتى بدونها لما استطاعت النظرية النسبية العامة - وسندرس أسسها فيمايلى من الكتاب - أن توسع

---

(١) انظر شرح هذه المسألة بتفصيل أكبر فى الملحق الثانى .

مجالها وأن يتسع تطبيقها إلى هذا الحد الشامل . ولست أن أبحاث منكوفسكى صعبة المنال على غير الرياضيين ولكنه لما كان يكفى لفهم الأفكار الأساسية لنظرية النسبية الخاصة والعامة إلماما خفيفاً بهذه الأبحاث فإنى سأتركها الآن على أن لا أعود إليها إلا عند نهاية الجزء الثانى من هذا الكتاب .

الجزء الثانى

نظرية النسبية العامة

الفصل الثامن عشر
نظريتا النسبية الخاصة والعامة

لقد كان المبدأ الأساسى الذى دارت حـوله كل الدراسات السابقة هو مبدأ النسبية الخاصة أى مبدأ النسبية الفيزيائية لكل حركة منتظمة . والآن دعنا مرة أخرى نحلل معناه بعناية ودقة .

لقد كان واضحاً فى جميع الأزمان أنه لا مندوحة - من حيث وجهة النظر التى تنقلها لنا - من اعتبار الحركة (كل حركة) حركة نسبية فقط . فـإذا عدنا إلى المثل الإيضـاحى الذى لجـأنا إليه كـثيراً - مـثل الطريق الحديدى وعربة الـقطار - فإننا نستطيع أن نعبـر عن حقيقـة الحركة التى تحدث هنا بالشكلين التاليين :

(أ) العربة فى حالة حركة بالنسبة إلى الطريق الحديدى .

(ب) الطريق الحديدى فى حالة حركة بالنسبة إلى العربة .

ويقوم فى (أ) الطريق الحديدى وفى (ب) عربة القطار مقام مجموعة الإسناد عند تقديرنا لحالة الحـركة لحادثة ما ، فإذا كان الأمـر ببساطة هو الكشف عن الحركة أو وصفها فلا أهمية من حيث المبدأ إلى أى مجموعة

إسناد نستند فهذا أمر كما سبق أن بينا واضح بنفسه للعيان ولكنه لا يجب الخلط بينه وبين النص الأكثر تعميما وشمولا والذى يسمى مبدأ النسبية الذى اتخذناه أساساً لأبحاثنا .

إن مبدأ النسبية لا ينص فحسب على أننا نستطيع أن نختار على السواء العربة أو الطريق كمجموعة إسناد لوصف أية حادثة (فهذا أيضاً واضح بنفسه للعيان) بل إنه فوق ذلك يؤكد على الأخص مايلى : أننا إذا صغنا القوانين الطبيعية العامة كما نحصل عليها بالتجربة باستعمال :

(أ) الطريق كمجموعة إسناد .

(ب) عربة القطار كمجموعة إسناد .

فإن هذه القوانين العامة (أى قوانين الميكانيكا وقانون انتشار الضوء فى الفراغ) يكون لها نفس الشكل فى كلتا الحالتين . ويمكن التعبير عن هذا على النحو التالى أيضاً : ليس لأى من مجموعتى الإسناد م ، مَ من حيث الملاءمة للوصف الفيزيائى للعمليات الطبيعية وضع فريد (أو حرفياً ليس لأى منهما ميزة خاصة) بالمقارنة بالمجموعة الأخرى . وعلى خلاف النص الأول فإن هذا النص الأخير ليس بالضرورة صحيحاً بداهة حيث إنه ليس مشمولا فى تصورى الحركة أو مجموعة الإسناد أو قابلا للاشتقاق منهما . بل إن التجربة وحدها هى التى يمكن أن تقرر صحته أو بطلانه .

ومع ذلك فإننا حتى الآن لم ندع أبداً تكافؤ جميع مجموعات الإسناد م لصياغة القوانين الطبيعية . فلقد كان كل ما ذهبنا إليه أقرب إلى مايلى :

فى أول الأمر ابتدأنا بفرض أن هناك مجموعة إسناد م حالتها من الحركة تجعل القانون الجاليلى التالى صحيحاً بالنسبة لها : إذا عزلت إحدى الجسيمات المادية عزلاً كافيا عن بقية الجسيمات وتركت وشأنها فإنها تتحرك بحركة منتظمة في خط مستقيم . فكانت القوانين الطبيعية كأبسط ما يكون بالنسبة إلى م (مجموعة إسناد جاليلية) ولكن بالإضافة إلى م وجدنا أنه ينبغى أن نعطى كل مجموعات الإسناد نفس الأفضلية فى هذا المعنى ؛ ولذلك يجب أن تكون هذه المجموعات مكافئة للمجموعة م من حيث الملاءمة لصياغة القوانين الطبيعية طالما كانت هذه المجموعات فى حالة حركة منتظمة فى خط مستقيم بالنسبة إلى م وليست فى حركة دوران . وعلى ذلك تعتبر كل مجموعات الإسناد هذه مجموعات إسناد جاليلية . ولذلك كانت صحة مبدأ النسبية مفروضة بالنسبة لهذه المجموعات لا لغيرها (أى لتلك التى تتحرك بحركة مختلفة النوع) إن هذا هو المعنى الذى نقصده عندما نتكلم عن مبدأ النسبية الخاصة أو نظرية النسبية الخاصة .

أما الآن فعلى العكس من هذا نود أن نعطى « مبدأ النسبية العامة» النص التالى : « كل مجموعات الإسناد م و مَ . . . إلخ متكافئة من

حيث ملاءمتها لوصف الظواهر الطبيعية (صياغة القوانين الطبيعية العامة) مهما كانت حالتها من الحركة» ولكن قبل أن نمضى إلى أبعد من هذا يجدر بى أن أشير إلى أن هذه الصيغة هى الأخرى مؤقتة أيضاً وسيصبح من الواجب استبدالها فيما بعد بأخرى أكثر إطلاقاً وشمولا لأسباب ستتضح فى حينها .

ومنذ أن وضح أن مبدأ النسبية الخاصة له ما يبرره كان طبيعياً جداً أن يحس كل راغب فى فهم أوسع وأعم ميلا فى قرارة نفسه إلى التقدم قدماً نحو مبدأ النسبية العامة . ولكن اعتباراً بسيطاً له وزنه يوحى - على الأقل فى وضعنا الحالى - بأن الأمل فى نجاح هذه المحاولة ضعيف جداً تعترضه صعاب هائلة لابد من التغلب عليها أولا . والآن دعنا نتخيل أننا قد انتقلنا إلى عربة القطار التى تسير بسرعة منتظمة . إن المسافر فيها لا يشعر بحركتها طالما هى تتحرك بانتظام ولهذا السبب يستطيع دون غضاضة أن يفسر الأمر على اعتبار أن العربة ساكنة والطريق هو الذى يتحرك . وفوق ذلك فإننا نجد أن هذا التفسير تبعاً لمبدأ النسبية الخاصة صحيح أيضاً من وجهة النظر الفيزيائية .

ولكن إذا تغيرت الآن حركة العربة إلى حركة غير منتظمة بسبب «فرملة» شديدة مثلا فإن المسافر سيشعر فوراً مقابل ذلك بدفعة قوية إلى الأمام ، وسيترتب على انحباس هذه الحركة آثار أخرى تتناول الأجسام التى فى العربة مما سوف يشاهده المسافر فيها . وسوف يختلف ما يحدث

فى هذه الحالة عما حدث فى الحالة التى تأملناها أولا ؛ ولهذا السبب يبدو أنه من المستحيل أن تكون القوانين الميكانيكية السائدة بالنسبة إلى العربة التى تتحرك بحركة منتظمة أو الساكنة هى نفس القوانين التى تنطبق فى حالة العربة التى تتحرك بحركة غير منتظمة . وعلى أية حال فإنه واضح جداً أن القوانين الجاليلية لا تنطبق على العربة التى تتحرك بحركة غير منتظمة . ومن أجل هذا نشعر أننا مضطرون فى الوضع الحالى إلى أن نضفى نوعاً من الحقيقة الفيزيائية المطلقة على الحركة غير المنتظمة مما لا يتفق مع مبدأ النسبية العامة . ولكننا سنرى سريعاً أن هذا الرأى الشطط لا يمكن أن يفرض علينا طويلا إذ سنجد لنا منه مخرجا سهلا .

الفصل التاسع عشر

مجـــال الجاذبيـــــة

إذا التقطت حجـراً ثم تركته وشأنه فلمـاذا يسقط على الأرض . . . ؟

إن الإجـابة المعـتادة عـلى هذا السـؤال هى أن الأرض تجذب الحـجـر . والفيزياء الحديثة تجيب إجابة مخـتلفة للأسباب الآتية : لقد أدت الدراسة المفصلة للظواهر الكهـرومغناطيسيـة إلى اعتبار أن التأثـير عن بعد - دون تدخل وسط ما بين الـطرفين - عملية مـستحـيلة ، فإذا جـذب مغناطيس قطعـة من الحديد مثـلا فإننا لا نكـتفى بأن نعـتبر أن مـعنى هذا هو أن المغناطيس يؤثر مباشرة على الحديـد خلال الفضاء الفارغ . ولكننا نضطر إلى أن نتخيل مع فرداى أن المغناطيس يخلق حوله شيئاً فيزيائياً حقيقياً - هو المجال المغـناطيسى يؤثر بدوره على قطعـة الحديد بحـيث يدفعـها إلى الحركة نحو المغناطيس . ولن نناقش هنا مـبررات هذه الفكرة العارضة ، وهى فى الحقيقة فكرة لا تخلو من التـعسف بوجه ما ، ولكننا نكتفى بأن نقـول إنه باستـخدام هذه الفكرة (فـكرة المجال) أمكن تفـسيـر الظواهر الكهرومغناطيـسية بطريقة أفضل بكثير مما لـو استبعدناها خصوصـاً فيما يتعلق بانتـشار الأمواج الكهـرومغناطيسيـة . وآثار الجاذبية أيضـاً تعامل بنفس الطريقة .

إن تأثير الأرض على الحجـر يحدث بطريقة غير مبـاشرة . فالأرض تخلق حولهـا مجالا جـاذبيا يؤثر على الحـجر مسـبباً سقـوطه . وتعلمنا التجربة أن شـدة التأثير على جسم ما تتناقص كلما ابتـعد هذا الجسم عن الأرض ، وذلك تبـعا لقـانون محـدد . وهذا يعنى من وجهـة نظرنا أن القانون الذي يحكم خواص مجال الجاذبية فى الفضاء لابد أن يكون قانونا تام التـجديد حتى يتـحدد بالضبط تناقص الأثر الجاذبى تبعاً لبعد الأجسام المؤثرة . وهذا القانون قريب ممايلى : «إن الجسم (أى الأرض) يولد حوله فيما يجاوره مباشرة مجالا ويحدد شدة واتجاه هذا المجال فى النقط البعيـدة عن الجسم «القانون الذى يحدد خواص المجالات نفسها فى الفضاء» .

وعلى العكس من المجالات المغناطيسية والكهـربائية نجد أن مجالات الجاذبيـة تنفرد بميزة خاصـة على جانب أساسى من الأهمـية . «ذلك أن الأجســام التى تتحرك تحت تأثيـر مجال الجاذبيـة فقط تتحـرك بعجلة لا تعتمد أبداً على الحالة المادية ولا الفيزيائية للجسم » . مثال ذلك أن قطعة الرصاص وقطعة الخشب تسقطان بنفس الكيفـية تحت تأثير مجال الجاذبية فى الفراغ سواء بدأ سقوطهما من حالة السكون أو ابتدآه بسرعة واحدة . ويمكن التعـبير عن هذا القانون الدقـيق بطريقة أخرى تبـعا لما يلى : إننا وفقاً لقـانون نيوتن للحركة نجد أن : القوة =- (كـتلة القصور الذاتى) × العجلة حيث تكون كتلة القصور ثابتاً مميزاً للجسم المعجل . فإذا أصبحت الآن الجاذبية سبب العجلة نجد أن :

حيث كتلة الجاذبية ثابت مميز للجسم . ومن هاتين المعادلتين نجد أن :

$$\text{العجلة} = \frac{\text{كتلة الجاذبية}}{\text{كتلة القصور الذاتى}} \times \text{شدة مجال الجاذبية}$$

فإذا كانت العجلة مستقلة عن طبيعة الجسم وحالته من السكون أو الحركة كما هو ثابت بالتجربة ، فعلى ذلك لابد أن تكون هذه العجلة واحدة بالنسبة إلى كل الأجسام . وإذا اخترنا الوحدات المناسبة أمكن أن نجعل هذه النسبة مساوية للوحدة . وبذلك نحصل على القانون : « كتلة الجاذبية لجسم ما مساوية لكتلة القصور الذاتى للجسم نفسه » .

صحيح أن هذا القانون المهم كان معروفاً من قبل فى الميكانيكا ولكن أحداً لم يفسره وقت ذاك ، ولا يمكن الوصول إلى تفسير مرض له ما لم نسلم بالحقيقة التالية : « إن خاصيتى القصور الذاتى والوزن لجسم ما (حرفيا الثقل) هما فى الحقيقة شىء واحد يبدو مرة بهذا الشكل والأخرى بالشكل الآخر حسب الظروف . وسنرى فى الفصل التالى لأى مدى يتفق هذا مع الواقع وسنرى كيف ترتبط هذه المسألة بفرض النسبية العامة .

الفصل العشرون

تساوى كتلتى القصور والجاذبية

كحجة فى صف المبدأ العام للنسبية

دعنا نتخيل حيزاً فارغاً قصياً ومنعزلاً عن النجوم وعن كل الكتل الأخرى ذات الحجم الذى يعتد به بحيث يتوافر لنا تقريباً فى هذا الحيز كل الشروط التى يتطلبها قانون جاليليو الأساسى . وعند ذلك سيكون ممكنا أن نختار مجموعة إسناد جاليلية لهذا الحيز (الجزء من العالم) ، وبالنسبة إلي هذه المجموعة ستستمر كل النقط الساكنة فى سكونها والنقط المتحركة كذلك ستستمر تتحرك فى حركة منتظمة فى خط مستقيم . دعنا نتخيل هذه المجموعة على هيئة قفص فسيح يشبه حجرة وبداخله راصد مزود بما يحتاج إليه من الأجهزة ، وطبعاً لا وجود للجاذبية بالنسبة إلى هذا الراصد بل إنه يجب عليه أن يربط نفسه بالحبال بأرضية القفص ، وإلا فإن أقل دفع على هذه الأرضية سيجعله يصعد ببطء نحو سقف القفص .

وقد ثبتنا وسط غطاء القفص من الخارج خطافاً مربوطاً به حبل . هب الآن أن كائناً (لا يعنينا هنا نوع هذا الكائن) بدأ يشد القفص من

الحبل بقوة ثابتـة عند ذلك سيبدأ القفص والراصد الذى فيه فى الصعود إلى أعلى بحركة منتظمة العجلة ومع الزمن ستـصل سرعتهما إلى قدر لم يسمع به من قبل ما دمنا نرصد كل هذا من مجموعة إسناد أخرى لا تتأثر بأى دفع .

ولكننا نريد الآن أن نرى كـيف ينظر الرجل الذى فى القـفص إلى هذه العمليـة . إن عجلة القـفص ستنتقل إلى الرجـل عن طريق رد فعل أرضية القفص وينبغى عليه إذاً أن يتـحمل هذا الضغط على قدميه إذا كان لا يريد أن يرتمى بكامل قامته على أرضية القفص . إنه يقف فى القفص، بنفس الطريقة التى يقف بها أى إنسان فى حـجرة من حجرات منزل على الأرض. وإذا ترك هذا الرجل جـسماً كـان فى يده من قبل وشـأنه عندئذ سيتوقف انتقال العجلة إلى هذا الجسم وسيسقط نحو الأرضية بحركة نسبية ذات عجلة وسيقنع الراصد نفسه بعـد ذلك « أن مقدار سقوط الجسم نحو أرضية القـفص سيظل ثابتاً (مقـداراً واحداً دائماً) مهمـا كان نوع الجسم الذى يستخدمه فى التجربة .

واستناداً إلى ما يعلمه الرجل جـيد العلم عن المجال الجاذبى (وهو ما قد وضحناه فى الفصل السابق) سيصل سريعاً إلى هذه النتيجة :

«إنه والقفص واقعان فى مجال جاذبى ثابت على مر الزمن » وبديهى أنه سيـتعجب لحظة لماذا لا يسـقط القفص فى هذا المجـال الجاذبى ولكنه سـيكتشف فـوراً الخطاف الذى يتوسـط غطاء القفص والحـبل المربوط به

وسيـصل تبعـاً لذلك إلى أن القفص مـعلق فى حالة سكـون فى المجال الجاذبى .

هل يجدر بنا أن نسخـر من الرجل وأن نقول إنه يخطىء الظن وإن تصوره للموقف باطل . . . ؟ لست أعتـقد أنه يجوز لنا ذلك إذا كنا نريد أن نكون منصـفين ، بل ينبغى علينا أن نسلم بأنه سلك فـى فهم الموقف سلوكا لا يتعارض مع العقل أو القوانين الميكانيكية المعروفة . فعلى الرغم من أن القفص يتـحرك بعجلة بالنسـبة للحيز الجـاليلى الذى فرضناه أولا فإننا نسـتطيع مع ذلك اعتـبار القفص سـاكناً وهكذا يصبح لدينا أسـباب قوية لتوسيع مدى مبدأ النسبية حتى يشمل مجموعات الإستاد التى تتحرك بعجلة .

الفصل الحادى والعشرون

ما هى أوجه النقص فى أسس الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة ..... ؟

ذكرنا مراراً فى سياق ما تقدم أن الميكانيكا الكلاسيكية تبدأ من هذا القانون : « إن الجسيمات المادية المعزولة عن بعضها البعض عزلاً كافياً تستمر إما على الحركة المنتظمة فى خط مستقيم وإما على السكون» .

ولقد أكدنا مراراً أن هذا القانون الأساسى لا يمكن أن يكون صحيحاً إلا بالنسبة إلى مجموعات الإسناد (م) ذات حالات فريدة معينة من الحركة والتى فى حالة حركة انتقال منتظمة بالنسبة لبعضها البعض ، أما بالنسبة إلى مجموعات الإسناد الأخرى (م) فإنه غير صحيح . وعلى ذلك فإننا نفرق فى كل من الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة بين مجموعات الإسناد (م) التى يمكن أن يقال إن قوانين الطبيعة المعروفة تنطبق عليها وبين مجموعات الإسناد (م) التى لا تنطبق عليها هذه القوانين .

ولكن هذا الوضع لا يتفق وسلامة المنطق . إننا سرعان ما نتساءل كيف يكون لبعض مجموعات الإسناد (أو حالاتها من الحركة) أفضلية على بقية المجموعات (أو حالاتها من الحركة) . . . ؟ ولماذا كان هذا التفضيل . . . ؟ ولكى أوضح جيداً معنى هذا السؤال دعنى أضرب لك مثلا :

هب أننى أقف أمام موقد غازى على جانبيه قدران متشابهان لا تميز العين بينهما ، وكلاهما ملىء حتى منتصفه بالماء وأنى أشاهد البخار يتصاعد باستمرار من أحدهما دون الآخر لا شك فى أن ذلك سيكون مدعاة للعجب حتى ولو لم أكن قد رأيت موقداً غازياً وقدرا من قبل ، ولكن لو أنى لا حظت وجود شىء أزرق اللون تحت القدر الأول دون الآخر لما كان هناك داع للاستغراب حتى ولو لم أكن قد رأيت شعلة غاز من قبل لأننى سوف أستطيع أن أقول إن هذا الشىء الأزرق هو السبب فى تصاعد البخار أو على الأقل يحتمل ذلك . وكان حريا بى أن أظل حائراً لو لم أكتشف هذا الشىء الأزرق اللون تحت أحد القدرين إذا كان سيتعين علىّ عندئذ أن أحاول اكتشاف ظرف آخر أسند إليه تصاعد البخار من أحد القدرين دون الآخر .

وبالمثل فإننا نسعى إلى اكتشاف شىء حقيقى فى الميكانيكا الكلاسيكية (أو فى نظرية النسبية الخاصة) نسند إليه اختلاف سلوك

مجمـوعات الإسناد م . لقد أدرك نيوتن هذا النقص وحـاول التغلب عليه ولكنـه فـشل فـى ذلك . ولكن مـاك أدركه إدراكـاً أوضح مـن الجمـيع ولهـذا طالب بإلحـاح بأن توضع الميكانـيكا على أسس جـديدة ولا يمكن تلافى هذا النقص إلا فى فـيزياء تتفق ومـبدأ النسـبية العـامة فمـعادلات نظـرية النسبية تنطبق على جميع مجموعات الإسناد أياً كانت حالتها مـن الحركة .

الفصل الثانى والعشرون

استنتاجات قليلة من مبدأ النسبية العامة

لقد رأينا فى الفصل العشرين كيف أن مبدأ النسبية العامة يضعنا فى موقف نستطيع معه أن نشتق صفات المجال الجاذبى بطريقة نظرية محضة. ولنفرض مثلا أننا نعرف كيفية حدوث عملية طبيعية ما ، زماناً ومكانا فى حيز جاليلى بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية م . إننا نستطيع بطريقة نظرية محضة (أى بمجرد الحساب) أن نحدد كيف تبدو نفس هذه العملية الطبيعية بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بعجلة بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م . وحيث إنه يوجد بالنسبة لهذه المجموعة الجديدة مَ مجال جاذبى فإننا نستطيع أيضاً على ذلك أن نحدد أثر هذا المجال على العملية موضوع الدراسة .

هب أننا نعلم أن جسماً يتحرك بحركة منتظمة فى خط مستقيم بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م (تبعاً لقانون جاليليو) فإنه يتحرك بعجلة فى خط منحن بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بعجلة (القفص) وهذه العجلة أو الانحناء تقابل تأثير المجال الجاذبى فى مَ على الجسم المتحرك ومن المعروف أن مجال الجذب يؤثر على حركة

الأجسام بهذا الشكل وعلى ذلك تكون هذه الأفكار لا جديد فيها .

ولكننا إذا طبقنا مثل هذه الأفكار على شعاع الضوء حصلنا على نتائج جديدة على قدر أساسى من الأهمية فمثل هذا الشعاع ينتقل بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية م بالسرعة حـ فى خط مستقيم ومن السهل أن نرى أن مسار الشعاع لا يصبح خطاً مستقيماً بالنسبة إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بعجلة . ومن هذا نستخلص الآتى : « تنتشر أشعة الضوء بوجه عام فى خطوط منحنية فى المجال الجاذبى» . ولهذه النتيجة وجهان على جانب كبير من الأهمية :

أولاً : أنه يمكن التحقق منها عملياً على الرغم من أن الدراسة النظرية التفصيلية أظهرت أن أنحناء الضوء الذى تستوجبه أو تكشف عنه نظرية النسبية ضئيل جداً بالنسبة إلى مجالات الجاذبية التى فى متناول أيدينا عملياً . ولكن مقداره بالنسبة للشعاع الذى يمر ملامساً للشمس يبلغ ١,٧ ثانية من القوس وهذا يمكن الاستدلال عليه بالطريقة التالية : بعض النجوم الثابتة تبدو لمن يرصدها من فوق الأرض من مجاورة الشمس ، وعلى ذلك يمكن رصدها فى أثناء الكسوف الكلي للشمس وفى مثل هذه الفترات يجب أن تبدو هذه النجوم كأنها بعدت عن

الشمس بالقدر السابق ذكره بالمقارنة مع موضعها الظاهرى حينما تكون الشمس فى مكان آخر من السماء ، والتحقق من صحة أو خطأ هذا الاستنتاج مسألة على جانب كبير من الأهمية وحلها العاجل منوط بالفلكيين[١] .

ثانياً : تثبت هذه النتيجة أنه تبعاً للنظرية العامة للنسبية لا يمكن أن تكون صحة قانون ثبوت سرعة انتشار الضوء فى الفراغ (وهو أحد الفرضين الأساسيين فى نظرية النسبية الخاصة والذى رجعنا إليه مرارا) بلا حدود . لأن انحناء أشعة الضوء لا يمكن أن يحدث إلا إذا تغيرت سرعة انتشاره مع موقعه . والآن قد نتوهم أنه تبعاً لذلك تكون نظرية النسبية الخاصة ومعها نظرية النسبية بأكملها قد تمرغت فى التراب مع أن هذا فى الواقع ليس صحيحاً . إنه لا يثبت إلا أن صحة النسبية الخاصة محدودة الأفق وأن نتائجها صحيحة فيما يتعلق بالظواهر التى يمكن أن نهمل أثر المجال الجاذبى فيها وحدها (أى الضوء) .

لما كان كثير من المعارضين للنظرية النسبية يحتجون بأن نظرية النسبية العامة تتعارض مع نظرية النسبية الخاصة فإنه من المفيد لتوضيح حقائق

---

(١) لقد ثبت انحراف الضوء بالقدر الذى تحدده النظرية بوساطة تصوير النجوم الذى قامت به بعثة أرسلتها الجمعية الملكية والجمعية الملكية للفلك أثناء كسوف الشمس فى ١٩١٩/٥/٢٩ (أنظر الملحق الثالث) .

هذا الموضوع أن نضرب لذلك مثلا مناسباً . لقد كنا قبل تقدم الديناميكا الكهربية ننظر إلى قوانين الكهرباء والإستاتيكية على أنها قوانين الكهرباء عموماً ولكننا الآن نعلم جميعاً أن المجالات الكهربائية يمكن اشتقاقها اشتقاقا صحيحاً من الاعتبارات الإستاتيكية فى حالة واحدة فقط وهى حالة لا تتحق أبداً تماماً وهى تلك التى تكون الكتل الكهربائية فيها ساكنة تماماً بالنسبة إلى بعضها البعض وبالنسبة إلى مجموعة الإسناد فهل نكون على حق إذا قلنا استناداً إلى هذا إن معادلات المجالات فى الديناميكا الكهربائية لماكسويل تتعارض مع الإستاتيكا الكهربائية، طبعاً لا لأن الإستاتيكا الكهربائية حالة خاصة من الديناميكا الكهربائية، فقوانين الأخيرة تؤدى إلى قوانين الأولى فى حالة عدم تغير المجالات مع الزمن .

وليس هناك لأية نظرية فزيائية مصير أسعد من أن تصبح هى نفسها لبنة فى بناء نظرية أوسع منها تعيش هى فيها كحالة محدودة خاصة .

وفى مثل انتقال الضوء الذى سقناه رأينا أن نظرية النسبية العامة تمكننا من أن نشتق نظرياً أثر مجال الجاذبية على العمليات الطبيعية التى نعرف قوانينها فى حالة عدم وجود مجال الجاذبية مقدما . ولكن المشكلة التى تلفت النظر أكثر من غيرها والتى تهدينا نظرية النسبية العامة إلى مفتاح حلها هى المشكلة التى تتعلق بالبحث عن القوانين التى يخضع لها مجال الجاذبية نفسه . ودعنا الآن نتأمل ذلك لحظة .

إننا على علم تام بمناطق الزمان - مكان التى تخضع بصفة تقريبية

للطريقة الجاليلية متى اخترنا مجموعة الإسناد المناسبة . وهذه هى النواحى التى تختفى فيها المجالات الجاذبية . فإذا أسندنا الآن ناحية منها إلى مجموعة الإسناد مَ التى تتحرك بأى نوع من الحركة فإنه ينشأ عن ذلك بالنسبة إلى مَ مجال للجاذبية يتغير بتغير الزمان والمكان[1] وطابع هذا المجال سيتوقف طبعاً على الحركة التى نختارها للمجموعة مَ . وتبعاً لنظرية النسبية العامة يجب أن ينطبق القانون العام للمجالات الجاذبية على المجالات الى نحصل عليها بهذه الطريقة . وعلى الرغم من أنه ليس هناك وسيلة للحصول على كل المجالات الجاذبية بهذا الشكل يجب مع ذلك أن نتمسك بأمل استخلاص قانون الجذب العام من مثل مجال الجاذبية هذا . ولقد تحقق هذا الأمل على أكمل وجه ولكن كان علينا مقدماً أن نتغلب على مشكلة كبرى تتصل بأعمق طبائع الأشياء وإننى لا أستطيع أن أخفيها عن القارىء أكثر من هذا . إننا فى أمس الحاجة إلى أن نوسع دائرة أفكارنا عن المتصل الزمكانى إلى مدى أبعد مما بلغناه حتى الآن .

(١) أن هذا ناتج من تعميم الفكرة التى نوقشت فى الفصل العشرين .

الفصل الثالث والعشرون
سلوك الساعات وقضبان القياس
على مجموعة إسناد تدور

لقد تجنبت عامـداً حتى الآن الكلام عن التفسيـر الفيزيائى لمدلولات الزمان والمكان فى حالة نظرية النسبية العـامة وعلى ذلك فإننى مسئول عن هذا التقصير خصوصاً والأمـر الذى نحن بصدده كما تعلمنا نظرية النسبية الخاصة أشد ما يكون عمـقاً وأهمية ولقد آن الأوان لكى نصحح هذا الخطأ ونسـتكمل هذا النقص ، وأبـادر بالقـول إن هذا لن يكون بالأمـر الهين بالنسبة إلى القارىء إذ سيتطلب منه صبرا جميلا وتأملا عميقاً وقدرة فائقة على التجريد .

ولنبدأ مـرة أخرى بحالات خاصـة طالما لجأنا إليهـا من قبل . دعنا نتخيل حيزاً من الزمان - مكان ليس به مجال جاذبى بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م التى اخترنا لها حالة مناسبة من الحركة . وفى هذه الحالة تكون م مجموعـة إسناد جاليلية بالنسبة إلى هذا الحيز تنطبـق عليها نتائج نظرية النسبية الخاصة . والآن دعنا نتخيل نـفس الحيز وقد أسندناه إلى مجموعة إسناد أخرى مَ تدور بانتظام بالنسبة إلى المجموعة م ، ولكن نحدد أفكارنا

ونوضحها دعنا نتخيل مَ على شكل قرص مستو يدور فى مستواه حول مركزه . فإذا كان هناك راصد على حافة هذا القرص فإنه سوف يحس بتأثير قوة طاردة فى اتجاه نصف قطر القرص قد يفسرها راصد كان فى حالة السكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد م على أنها من تأثير القصور الذاتى (قوة الطرد المركزية) ولكن الراصد الذى على القرص قد يعتبر هذا القرص مجموعة إسناد « ساكنة » وهو على أساس مبدأ النسبية العامة لا تنقصه المبررات ليفعل ذلك وتكون القوة التى تؤثر عليه وعلى كل الأجسام الأخرى الساكنة بالنسبة إلى القرص راجعة فى اعتباره إلى تأثير مجال جاذبى . ومع ذلك فإن التوزيع المكانى (فى المكان) لهذا المجال الجاذبى من نوع يستحيل تحقيقه على أساس نظرية نيوتن للجاذبية[1] ولكن هذا لا يزعج الراصد الذى يؤمن ويتمسك بنظرية النسبية العامة فهو مصيب حينما يعتقد أنه من الممكن صياغة قانون عام للجاذبية لا يفسر فحسب حركات النجوم تفسيراً سليماً بل يفسر أيضاً مجال القوة التى يتعرض لها فى هذه التجربة .

ويجرى الراصد تجاربه على قرصه الدائرى مستعملا الساعات وقضبان القياس وهو حين يفعل ذلك يهدف إلى أن يصل إلى تعاريف مضبوطة لمعنى مدلولات الزمان والمكان بالنسبة إلى القرص الدائرى مَ على أساس ملاحظاته فما عساه فاعل فى هذا المضمار . . . . ؟

(١) ان المجال يختفى عند مركز القرص ويزيد زيادة مضطردة تتناسب مع البعد عن المركز كلما تقدمنا إلى الخارج .

إنه أولاً سيـضع ساعتين مـتماثلتين فى التـركيب واحدة عند مـركز القرص والأخـرى عند حافته بحـيث تكونان ساكنتين بالنسبـة للقرص . ونحن الآن نتساءل هل ستجرى الساعتان بمعدل واحد من وجهة نظر (أى بالنسبة إلى الراصد على) مجـموعة الإسناد الجاليلية التى لا تدور م . . ؟ إننا نجد أنه بالنسبة إلى هذا المرجع ستكون الساعة التى فى المركز ثابتة لا سرعـة لها بينما حـصلنا عليهـا فى الفصل الثانى عـشر نجد أن السـاعة الأخيـرة ستكون أبطأ بصـفة دائمـة من الساعـة التى عند مركـز القرص الدائرى كـما يـراها الراصد على م ، وواضح أن راصداً على القـرص بجـانب الساعـة التى عند المركـز سيـرى نفس الشىء . وهكذا سـتكون الساعة على قـرصنا الدائرى أو فى كل مجال جاذبـى وذلك لجعل الحالة أكثر شمولاً - أسرع أو أقل إسراعاً تبعاً للموضع الذى توضع فيه الساعة (فى حالة السكون) . ولهذا السبب يستحيل علينا أن نحصل على تعريف معقـول للزمن بوساطة ساعـات ضبطت وهى فى حالة السكون لمجـموعة الإسناد . وتواجهنا صـعوبة مماثلة عندما نحاول أن نطبق تعـريفنا السابق للآنية فى مـثل هذه الحالة . ولكننى لا أريد أن أخـوض فى هذا الموضوع إلى أبعد من هذا .

وفوق ذلك يثـير أمامنا - فى هذا الطور - تعريف إحـداثيات المكان أيضا صعوبات لا يمكن التـغلب عليها . فإذا طبق الراصد قضبـان قياسه العيارية (قـضيب قياس قصـير إذا قورن بنصف قطر القرص) مماسـة لحافة القرص فـإن طول هذا القضيب بالنسبـة إلى راصد على مجمـوعة الإسناد

الجاليلية سيكون أقل من الواحد الصحيح لأن الأجسام المتحركة تعانى - تبعا للفصل الثانى عشر - قصراً فى اتجاه الحركة . ومن الناحية الأخرى لا يعانى قضيب القياس قصرا فى طوله كما يبدو من م إذا طبق على القرص فى اتجاه نصف قطره . وإذا قاس الراصد أولا محيط القرص بقضيب قياسه ثم قاس قطره فإنه إذا قسم نتيجتى القياس الواحدة على الأخرى لن يحصل كخارج للقسمة على العدد المعتاد ط = ٣,١٤ بل على عدد أكبر[١] بينما يكون ناتج هذه العملية طبعا بالنسبة إلى قرص ساكن بالنسبة إلى م هو ط بالضبط وهذا يثبت أن قضايا هندسة إقليدس لا تنطبق تماماً على القرص الدائر ولا على المجال الجاذبى بصفة عامة على الأقل إذا اعتبرنا طول قضيب القياس هو الواحد الصحيح فى كل الأوضاع والاتجاهات . ومن هذا تفقد فكرة الخط المستقيم أيضاً معناها . ولسنا على ذلك فى وضع نستطيع معه أن نعرِّف بدقة الإحداثيات س . ص . ش بالنسبة للقرص بوساطة الطريقة التى اتبعناها فى أثناء دراسة نظرية النسبية الخاصة وطالما كما لا نستطيع تحديد إحداثيات أمكنة وأزمنة الحوادث فإننا بالتالى لا نستطيع أن نعطى معنى دقيقا للقوانين الطبيعية التى تذكر فيها هذه الإحداثيات .

---

(١) علينا أن نستعمل خلال هذا البحث مجموعة الاسناد الجاليلية غير الدوارة لأننا نستطيع التسليم إلا بصحة نتائج نظرية النسبية الخاصة بالنسبة إلى م (فبالنسبة إلى مَ يسود المجال الجاذبى) .

وهكذا تبدو كل استنتاجاتنا السابقة القائمة على النسبية العامة موضع تساؤل ومرجع هذا فى الحقيقة إننا أصبحنا فى أمس حاجة إلى الالتجاء إلى حركة التفاف بارعة حتى نستطيع أن نطبق مبدأ النسبية العامة تطبيقاً صحيحاً وسأعد القارئ بذلك فى الفصول التالية .

الفصل الرابع والعشرون
المتصل الإقليدى واللاإقليدى

تخيل أيها القارىء العزيز أن سطح مائدة رخامية قد بسط أمامنا . إننا نستطيع أن ننتقل من أية نقطة على هذه المائدة إلى أية نقطة أخرى عليها بأن نتسلل باستمرار من نقطة إلى نقطة «مجاورة» ونستطيع تكرار هذه العملية ما شئنا . وبعبارة أخرى نقول أننا نستطيع الانتقال دون أن نقوم بأية «قفزات» وإنى واثق أن القارىء يقدر بوضوح تام ما أقصده هنا بلفظى « مجاورة » و « قفزات » ما لم يكن متعنتاً فوق ما ينبغى . ونحن نعبر عن هذه الخاصة للسطح بأن نصفه بأنه متصل .

دعنا نتخيل الآن أن لدينا عدداً كبيراً من القضبان الصغيرة متساوية الطول وأن طولها صغير بالمقارنة بأبعاد قطعة الرخام ، وأعنى حينما أقول متساوية الطول أننا إذا طبقناها الواحد على الآخر تقابلت كل أطرافها تماماً . ثم دعنا ندع أربعة من هذه القضبان على المائدة الرخامية بحيث تكوِّن فيما بينها شكلا رباعياً (مربعاً) قطراه متساويان طولا . ولكى نتأكد من تساوى القطرين نستعمل قضيب اختبار قصير . ثم دعنا نضيف إلى هذا المربع مربعات متشابهة كل منها يشترك مع المربع الأول فى

قضيب . ثم نوالى القيام بهذه العملية مع كل المربعات حتى تغطى أخيراً كل القطعة الرخامية تماما بالمربعات وهذا الترتيب يجعل كل جانب من أى مربع مشتركا بين مربعين وكل ركن مشتركاً بين أربعة مربعات .

وسيكون مدعاة للعجب حقا أن نستطيع الاستمرار فى هذه العملية دون أن تكتنفنا الصعاب وما علينا إلا أن نفكر فيمايلى : إذا تقابلت فى أية لحظة ثلاثة مربعات فى ركن فإن جانبين من المربع الرابع يكونا قد وضعا ويكون تبعاً لذلك وضع الجانبين الآخرين قد تحدد تماما ، ولكننى الآن لم أعد قادراً على ضبط الشكل الرباعى بحيث أن يتساوى قطراه فإذا جاءا متساويين تلقائياً فهذه منحة خاصة تهيئها خواص المائدة الرخامية وقضبان القياس لا أملك حيالها إلا الدهشة شاكراً ، ولابد لنا من كثير من أمثال هذه المفاجئات إذا كان لابد من نجاح التركيب .

وإذا مر كل شىء بسلام فإننى يحق لى أن أقول عند ذلك إن نقط المائدة الرخامية متصل إقليدى بالنسبة إلى قضبان القياس التى استعملت «كمسافة» (فترة - خطية) وإنى إذا أخذت ركناً من مربع واعتبرته «أصلا» أو نقطة إبتداء فإنى أستطيع أن أصف وصفاً تحديدياً كل ركن آخر لاى مربع ما بالنسبة إلى هذا الأصل بوساطة عددين ، فما علىّ إلا أن أذكر عدد القضبان التى يجب أن أمر فوقها ابتداء من الأصل أولا يميناً ثم إلى أعلى بعد ذلك حتى أصل إلى الركن موضع الاعتبار . وهذان العددان

يكونان عند ذلك «الإحداثيين الكارتيزيين» لهذا الركن بالنسبة إلى «مجموعة الإسناد الكارتيزية» التى يحددها ترتيب قضبان القياس .

ونحن إذا حورنا هذه التجربة المجردة التحوير التالى اهتدينا إلى أنه لابد هناك حالات لا تنتهى فيها التجربة بالنجاح . سوف نتصور أن القضبان تتمدد بمقدار يتناسب مع زيادة درجة حرارتها ثم نسخن وسط المائدة الرخامية دون أطرافها ففى هذه الحالة يمكن أن يظل قضيبان من قضبان القياس متطابقين فى كل موضع على المائدة ولكن التركيب الذى أنشأناه من المربعات لابد وأن يضطرب فى أثناء التسخين لأن القضبان التى على وسط المائدة تتمدد بينما تظل تلك التى على الأطراف بلا تمدد .

وبالنسبة إلى قضبان القياس التى أعتبرناها - وحدة الأطوال - لا تعود المائدة الرخامية متصلا إقليدياً ولا نعود نحن أيضاً فى وضع نستطيع معه تحديد الإحداثيات الكارتيزية مباشرة بوساطتها، ولكنه لما كان هناك أجسام أخرى لا تؤثر عليها درجة حرارة المائدة على نحو ما أثرت على قضبان القياس (وربما لا تتأثر إطلاقاً) لذلك قد يكون ممكنا أن نتمسك بوجهة النظر التى تعتبر المائدة «متصلا إقليدياً» ويمكننا الوصول إلى هذا وبطريقة مرضية لو أننا أجرينا تعويضاً بارعاً فى عملية قياس أو مقارنة الأطوال .

ولكن إذا كانت القضبان من جميع الأنواع (أى من جميع الأجسام) تسلك جميعها على قطعة الرخام متفاوتة التسخين فيما يتعلق بتأثير الحرارة عليها نفس السلوك ، وإذا لم يكن لدينا أية وسيلة لبيان تأثير الحرارة غير

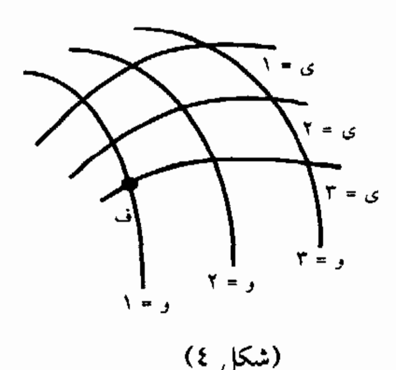
السلوك الهندسى لقضبان القياس فى التجارب المماثلة للتجربة التى تقدم وصفها فإن الخطة المثلى لدراسة سطح المائدة هى أن نطلق اسم المسافة واحدة» على نقطتين على السطح ما دام يمكن أن نجعل نهايتى قضيب من قضبان القياس تنطبقان على هاتين النقطتين لأنه ليس أمامنا وسيلة أخرى حتى نتفادى أن تكون العملية تعسفية إلى أبعد مدى . وعلى ذلك يجب أن نسقط طريقة الإحداثيات الكارتيزية وأن نبحث عن طريقة أخرى لا تفترض صحة هندسة إقليدس بالنسبة إلى الأجسام الجاسئة[1] ويلاحظ القارىء أن هذا الموقف يناظر الموقف الذى أدى إليه المبدأ العام للنسبية فى الفصل الثالث والعشرين .

(١) الوضع الرياضى لهذه المشكلة هو . إذا كان لدينا مسطح ما (بيضاوى مثلا) فى فضاء اقليدى ثلاثى الأبعاد فانه يوجد لهذا السطح هندسة ثنائية الأبعاد كما يوجد بالنسبة للمستوى . ولقد قام جاوس بمعالجة هذه الهندسة الثنائية الابعاد من المبادىء الأولى دون أن يلجأ إلى حقيقة كون السطح يتعلق بمتصل اقليدى ثلاثى الأبعاد فإذا تخيلنا أننا نقيم انشاءات بوساطة قضبان جاسئة فى السطح (مشابهة لتلك التى أقمناها فى السطح الرخامى) فإننا سنجد أن القوانين التى تنطبق على هذه الانشاءات تختلف عن القوانين التى تؤدى إليها هندسة اقليدس المستوية فليس السطح متصلا اقليديا بالنسبة إلى قضبان القياس ولا نستطيع تعيين الاحداثيات الكارتيزية فى السطح . ولقد أوضح جاوس المبادىء التى يمكن تبعا لها معالجة العلاقات الهندسية على السطح وهكذا اوضح معالم الطريق إلى طريقة **ريمان** فى معالجة المتصلات اللاإقليدية متعددة الأبعاد . وهكذا كان الرياضيون هم الذين حلوا منذ أمد بعيد المشكلات الشكلية التى يقودنا إليها مبدأ النسبية العامة .

الفصل الخامس والعشرون

إحداثيات جاوس

يرى جـاوس أن الوسيلة التـى تجمع بين التـحليل والهندسـة والتى تصلح لعـلاج المشكلة يمكن بلوغـهـا على النحو الآتـى : لذلك نتخـيل مجـموعـة من المنحنيات الاختـيارية (انظر الشكل ٤) رسـمت على سطح المائدة ونـسميـها المنحنيات (ى) ونشير إلى كل منها بعـدد وقد رسمنا فى



(شكل ٤)

الشكل التوضيـحى المنحنيات ى = ١ ، ى = ٢ ، ى = ٣ ، ويجب أن نتـخيل بـين المنحنيين ى = ١ ، ى = ٢ عـدداً لا نهائيـاً من المنحنيـات

مرسوماً ، وجميعها تناظر الأعداد الحقيقية الواقعة بين ، ، ، وبذلك
نحصل علي نظام من المنحنيات ى . وهذا النظام المتناهى الكثافة يغطى سطح المائدة كله وهذه المنحنيات ى يجب أن لا تتقاطع مع بعضها البعض ، ويجب ألا يمر بالنقطة الواحدة من السطح إلا منحنى واحد وواحد فقط . وهكذا يكون لكل نقطة على السطح قيمة (ى) محددة تماماً . وبالمثل يمكن أن نتخيل نظاماً من المنحنيات (و) مرسوماً على السطح وهو يخضع لجميع شروط المنحنيات ى فهو مزود بأعداد بطريقة مماثلة ويمكن أيضاً أن يكون شكله اختيارياً . ويتبع ذلك أن يكون لكل نقطة على سطح المائدة قيمة (ى) وقيمة (و) ويسمى هذان العددان إحداثى سطح المائدة (الإحداثيات الجاوسيان) فالنقطة ف مثلا فى الشكل التوضيحى لها الإحداثيان ى = ٣ ، و = ١ ، وتقابل النقطتان المتجاورتان ف ، فَ على السطح الإحداثيات :

ف : ى ، و

فَ : ى + ء ى ، و + ء و

حيث يعنى ء ى ، ء و عددين صغيرين جداً . وبنفس الطريقة نستطيع أن نشير إلى المسافة (الفترة - الخطية) بين ف ، فَ مقيسة بقضيب القياس بوساطة العدد الصغير جداً ، ء ط وقد وجد جاوس أن :

$$ء ط^{٢} = ل_{١١} ء ى^{٢} + ٢ ل_{١٢} ء ى ء و + ل_{٢٢} ء و^{٢}$$

حيث $ل_{١١}$ ، $ل_{١٢}$ ، $ل_{٢٢}$ مقادير تعتمد بطريقة محددة جداً على ى ، و والمقادير $ل_{١١}$ ، $ل_{١٢}$ ، $ل_{٢٢}$ تحدد سلوك القضبان بالنسبة للمنحنيات (ى) والمنحنيات (و) وبالتالى بالنسبة لسطح المائدة أيضاً . وفى الحالة التى تكوِّن فيها نقط السطح محل الاعتبار متصلا إقليدياً بالنسبة إلى قضبان القياس يمكن رسم المنحنيات ى ، المنحنيات و وربط أعداد بالنسبة لها وفق المعادلة :

$$ء ط^{٢} = ء ى^{٢} + ء و^{٢}$$

وبهذه الشروط تكون المنحنيات ى ، و خطوطا مستقيما بالمعنى الإقليدى وتكون متعامدة مع بعضها البعض ، وتكون إحداثيات جاوس هنا إحداثيات كارتيزية بكل بساطة . ومن الواضح أن إحداثيات جاوس ليست أكثر من ارتباط مجموعتين من الأعداد مع نقط السطح موضع الاعتبار بحيث تكون القيم العددية التى تختلف فيما بينها اختلافاً ضئيلا مرتبطة بالنقط المتجاورة « فى المكان» .

وحتى الآن كنا نطبق هذه الأفكار على متصل ثنائى الأبعاد ولكن طريقة جاوس هذه يمكن أن تطبق بسهولة على متصل ثلاثى الأبعاد أو رباعيها أو حتى أكثر من ذلك فإذا كان ممكنا الحصول على متصل رباعى الأبعاد فإننا يمكن أن نصوره بالطريقة الآتية : نربط بطريقة اختيارية كل نقطة من نقط هذا المتصل بأربعة أعداد $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ، $س_{٤}$ وتعرف بالإحداثيات ويقابل النقط المتجاورة قيم متقاربة للإحداثيات فإذا كانت

المسافة ء ط مرتبطة بالنقطتين المتجاورتين ف ، ف وهى قابلة للقياس والتحديد فيزيائياً فإن المعادلة التالية تكون صحيحة :

$$ء ط^{2} = ل_{11} ء س_{1}^{2} + 2 ل_{12} ء س_{1} ء س_{2} + \cdots\cdots + ل_{44} ء س_{4}^{2}$$

حيث تكون المقادير $ل_{11}$ . . . إلخ قيماً تتغير مع الموقع فى المتصل . ولا يمكن أن نربط الإحداثيات $س_{1}$ . . . $س_{4}$ مع نقط المتصل بحيث يصبح لدينا ببساطة :

$$ء ط^{2} = ء س_{1}^{2} + ء س_{2}^{2} + ء س_{3}^{2} + ء س_{4}^{2}$$

إلا إذا كان المتصل إقليدياً . وفى هذه الحالة تظل العلاقات فى المتصل الرباعى قائمة على النحو الذى تقوم عليه فى قياساتنا الثلاثية الأبعاد .

ومع ذلك فليست معالجة جاوس للمقدار ء $ط^{2}$ التى أوضحناها عاليه ممكنة دائما إذ يقتصر ذلك على الحالات التى نضع فيها موضع الاعتبار مناطق من المتصل صغيرة بدرجة تكفى لاعتبارها متصلات إقليدية . وهذا مثل ينطبق بوضوح على حالة المائدة الرخامية ذات التغير المحلى لدرجة الحرارة (متفاوتة التسخين) فإن درجة الحرارة ثابتة عملياً بالنسبة إلي جزء صغير من المائدة ، وهكذا يكون السلوك الهندسى لقضبان القياس تقريبياً كما يجب أن يكون وفق قواعد هندسة إقليدس ، ومن هنا نرى لماذا كان

الخلل فى إنشاء المربعات فى الفصل السابق لا يتضح جلياً إلا إذا امتد هذا الإنشاء فوق جزء كبير من سطح المائدة .

يمكننا أن نلخص ما تقدم فيمايلى : لقد اخترع جاوس طريقة نستطيع بها معالجة المتصلات عموما علاجا رياضياً وهذه الطريقة تحدد علاقات الحجم أو الكم («المسافات » بين النقط المتجاورة) بأن تختص كل نقطة فى المتصل بعدد من الأعداد يساوى ما له من الأبعاد ويتم ذلك بشكل يجعل للمخصصة معنى واحداً ويجعل الأعداد (الإحداثيات الجاوسية) التى تخصص لنقط متجاورة تختلف فيما بينها بمقادير متناهية فى الصغر . ومجموعة الإحداثيات الجاوسية تعميم منطقى لمجموعة الإحداثيات الكارتيزية ويمكن تطبيقها أيضاً على المتصلات اللاإقليدية وذلك فقط عندما تسلك - من حيث الحجم أو المسافة المحددان - الأجزاء الصغيرة من المتصل محل الاعتبار سلوكاً يشبه النظام الإقليدى - وذلك كلما صغر الجزء من المتصل الذى نطبقها عليه .

الفصل السادس والعشرون
المتصل الزمان والمكان فى نظرية النسبية الخاصة
على إعتبار انه متصل إقليدى

إننا الآن فى وضع نستطيع معه أن نصوغ فكرة منكوفسكى التى أشرنا إليها مجرد إشارة عابرة فى الفصل السابع عشر بدقة أتم . لقد رأينا أنه تبعاً لنظرية النسبية الخاصة تَفضُلُ بعض مجموعات الإسناد من حيث الملاءمة لوْصف المتصل الزمان والمكان الرباعى الأبعاد غيرها . ولقد سمينا هذه المجموعات المفضلة مجموعات إسناد جاليلية . ولقد أوضحنا فى الجزء الأول من هذا الكتاب تفصيلا التعريف الفيزيائى للإحداثيات الأربعة س ، ص ، ش ، ز التى تحدد الحادثة أو بعبارة أخرى النقطة فى المتصل رباعى الأبعاد . وفى حالة الانتقال من مجموعة إسناد جاليلية إلى أخرى تتحرك بحركة منتظمة بالنسبة للأولى تنطبق معادلات تحويل لورنتز . وهذه المعادلات هى الأساس الذى يرتكز عليه اشتقاق الاستنتاجات من نظرية النسبية الخاصة . وهى فى حد ذاتها (أى المعادلات) ليست إلا التعبير عن صحة قانون انتشار الضوء بالنسبة إلى مجموعات الإسناد الجاليلية .

ولقد وجد منكوفسكى أن تحويلات لورنتز تحقق الشروط البسيطة الآتية : دعنا نتخيل حادثتين متجاورتين يحدد مكانهما النسبى فى المتصل رباعى الأبعاد بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية مَ الفروق المكانية الإحداثية ء س ، ء ص ، ء **ش** والفرق الزمانى ء ز ، وسنفرض أن الفروق المقابلة لهاتين الحادثتين بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية أخرى هى ء س ، ء صَ ، ء شَ ، ء زَ فإنه فى هذه الحالة تحقق هذه المقادير دائماً الشرط التالى[1] :

$$\text{ء س}^{٣} + \text{ء ص}^{٢} + \text{ء ش}^{٢} - \text{ء ز}^{٣}\ \text{حـ}^{٢} = \text{ء سَ}^{٢} + \text{ء صَ}^{٢} + \text{ء شَ}^{٢} - \text{ء زَ}^{٢}\ \text{حـ}^{٢}$$

وصحة تحويل لورنتز مترتبة على هذا الشرط ونستطيع أن نعبر عن ذلك كمايلى :- المقدار

$$\text{ء ف}^{٢} = \text{ء س}^{٢} + \text{ء ص}^{٢} + \text{ء س}^{٢} - \text{حـ}^{٢}\ \text{ء ز}^{٢}$$

وهو يتعلق بنقطتين متجاورتين من نقط المتصل الزمانى المكانى رباعى الأبعاد له نفس القيمة بالنسبة إلى كل مجموعات الإسناد المختارة (الجاليلية) وإذا استبدلنا بالمقادير س ، ص ، ش ، $\sqrt{-١}$ حـ ز

المقادير $\text{س}_{١}$ ، $\text{س}_{٢}$ ، $\text{س}_{٣}$ ، $\text{س}_{٤}$ نحصل أيضاً على :

---

(١) انظر الملحق ١ ، ٢ فالعلاقات التى اشتقت هناك للاحداثيات نفسها صحيحة أيضا لفروق الاحداثيات وكذلك أيضا لتفاضلات الاحداثيات (الفروق المتناهية الصغر) .

$$\text{ء ف}^{٢} = \text{ء س}_{١}^{٢} + \text{ء س}_{٢}^{٢} + \text{ء س}_{٣}^{٢} + \text{ء س}_{٤}^{٢}$$

مستقلة عن اختيار مجموعة الإسناد (أى أياً كانت مجموعة الإسناد) ونسمى المقدار ء ف « المسافة » التى تفصل بين الحادثتين أو النقطتين رباعيتى الأبعاد .

وهكذا نجد أننا إذا اخترنا كمتغير للزمن المتغير الخيالى $\sqrt{-١}$ حـ ز بدلا من الكمية الحقيقية ز فإننا نستطيع أن نعتبر المتصل الزمانى - المكانى المتفق مع نظرية النسبية الخاصة متصلا إقليدياً رباعى الأبعاد وهذه هى النتيجة التى تؤدى إليها اعتبارات الفصل السابق .

الفصل السابع والعشرون
المتصل الزمانى والمكانى الخاص بالنظرية النسبية العامة
ليس متصلا إقليديا

استطعنا فى الجزء الأول من هذا الكتاب أن نستعمل إحداثيات زمكانية كان من الممكن تفسيرها تفسيراً فيزيائيا بسيطاً مباشراً وكان من الممكن اعتبارها كما وُضح فى الفصل السادس والعشرين إحداثيات كارتبزية رباعية الأبعاد . وكان هذا ممكناً استناداً إلى قانون ثبوت سرعة الضوء . ولكننا قد رأينا فى الفصل الحادى والعشرين أن نظرية النسبية العامة لا يمكن أن تحتفظ بهذا القانون بل على العكس ظهر أنه تبعاً لهذه النظرية الأخيرة لابد أن تعتمد سرعة الضوء دائماً على الإحداثيات متى وجد مجال جاذبى . وفى سياق توضيح هذا الأمر فى الفصل الثالث والعشرين وجدنا أن وجود المجال الجاذبى يبطل تحديد الإحداثيات والزمن ذلك التحديد الذى استخدمناه فى النظرية النسبية الخاصة .

ونتيجة لهذه الاعتبارات انتهينا إلى الأقتناع بأن المتصل الزمانى المكانى فى النظرية النسبية العامة لا يمكن اعتباره متصلا إقليديا بل إننا نجد هنا الحالة العامة التى تمثلها المائدة الرخامية فى حالة الاختلاف الموضعى

فى درجة الحرارة (مقاومة التسخين) والتى اعتبرناها متصل ثنائى الأبعاد .

وكما كـان مستحيـلا هناك بناء مجموعـة إحداثيات كارتيزية من قـضبان القياس المتـساوية فإنه يسـتحيل هنا أيضاً أن نتخـذ مجموعـة من الأجسام الجاسئة والساعات (مجموعة إسناد) بحيث تكون قضبان القياس والساعات التى رتبت ترتيباً جـاسئا (متمـاسكاً) بالنسبة إلى بعضهـا البعض قادرة على تحديـد الموقع والزمن مباشـرة . ولقد كـان هذا هو لب المشكلة التى واجهتنا فى الفصل الثالث والعشرين .

ولكن الاعتبـارات التى استعرضناها فى الفصلين الخـامس والعشرين والسادس والعشرين ترشدنا إلى طريقة التغلب على هذه الصعوبة . ذلك بأن نسند المتـصل الزمانى المكانى لرباعى الأبعـاد إلى إحداثيـات جاوس بطريقة حكيمة ونخص كل نقطة من المتـصل (حادثة) بأربعة اعداد س$_{١}$ ، س$_{٢}$ ، س$_{٣}$ ، س$_{٤}$ وهى إحداثيات ليس لها أقل معنى فيزيائى مباشر بل لمجرد ترقيم نقط المتصل بطريقة محـددة ولكنها اختيارية . ولا يستوجب هـذا الترتيب حتى أن نعتبـر س$_{١}$ ، س$_{٢}$ ، س$_{٣}$ إحداثيات « مكـان » و س$_{٤}$ إحداثى زمن .

وقد يظن القارىء أن تصوير العالم على هذا النحو تصوير مشوه فما معنى أن نخص حادثة ما بالإحداثيات الخاصة س$_{١}$ ، س$_{٢}$ ، س$_{٣}$ ، س$_{٤}$ إذا كانت هذه الإحداثيات في حد ذاتـها ليس لها معنى ؟ ولكننا لو تمعنا الموضوع بعناية أكثر لرأينا أنه لا أساس لهذا القلق . فلو تأملنا مثلا نقطة

مادية تتحرك بأية حركة لوجدنا أنه لو كان وجود هذه النقطة لحظيا لا يستمر مع الزمن لأمكن وصفها وتحديدها فى الزمان - مكان بمجموعة واحدة من القيم س١ ، س٢ ، س٣ ، س٤ . وهكذا يجب أن يتمثل استمرار وجودها بعدد لا نهائى من مثل هذه المجموعات من القيم التى تكون قيمها الإحداثية أيضا متقاربة جداً بحيث توحى بالاستمرار . وعلى ذلك يصبح لدينا مقابل كل نقطة مادية خط كونى (أحادى الأبعاد) فى المتصل لرباعى الأبعاد . وهكذا تناظر هذه الخطوط فى المتصل نقطاً كثيرة تتحرك والحالة الوحيدة التى تصبح فيها هذه النقط ذات وجود فيزيائى هى فى الحقيقة حالة تقابلها . وحالة التقابل هذه نعبر عنها رياضياً بأن يكون الخطان اللذان يمثلان حركتى النقطتين موضوع البحث لهما مجموعة خاصة من القيم الإحداثية س١ ، س٢ ، س٣ ، س٤ مشتركة بينهما . وإذا تأمل القارىء هذا الأمر ملياً فلا شك أنه سيسلم بأن مثل هذه التقابلات فى الحقيقة هى الشاهد الفعلى الوحيد على الجوهر الزمكانى الذى تتضمنه البيانات الفيزيائية .

إننا إذ نصف حركة نقطة مادية بالنسبة إلى مجموعة إسناد لا نذكر شيئاً أكثر من تقابلات هذه النقطة مع نقط خاصة من مجموعة الإسناد . ونستطيع أيضاً أن نحدد القيم الزمانية المناظرة بوساطة رصد تقابلات الجسم مع الساعات مرتبطة مع رصد تقابل عقارب الساعات مع نقط معينة على ميناء تلك الساعات . وهو نفس ما يحدث فى حالة قياسات المكان

بوساطة قضبان القياس كما يتضح ذلك جيداً لو تأملناه قليلاً ببعض الإمعان .

إن ما يلى صحيح بوجه عام : إن كل وصف فيزيائى يتحلل ذاتياً إلى عدد من النصوص يشير كل منها إلى تطابق زمكانى لحادثتين أ ، ب وإذا عبرنا عن كل نص من هذه النصوص بدلالة إحداثيات جاوس نقول إن الإحداثيات الأربعة $س_1$ ، $س_2$ ، $س_3$ ، $س_4$ لكلا الحادثتين واحدة . وهكذا نحل فى الحقيقة بصورة كاملة وصف المتصل الزمكانى بوساطة إحداثيات جاوس محل وصف المتصل بوساطة مجموعات الإسناد ويجنبنا الأول منهما أوجه النقص التى تنطوى عليها الطريقة الثانية فليس مقيداً بضرورة فرض الطابع الإقليدى على المتصل الذى نريد تمثيله .

الفصل الثامن والعشرون
التعبير الدقيق عن مبدأ النسبية العام

إننا الآن فى وضع يسمح لنا بأن نستبدل بالتعبير المؤقت عن مبدأ النسبية العام الذى قدمناه فى الفصل الثامن عشر تعبيراً آخر دقيقاً جداً . لقد كان تعبيرنا عن ذلك المبدأ على هذه الصورة : كل مجموعات الإسناد م ، مَ . . . إلخ متكافئة من حيث وصف الظواهر الطبيعية (أو صياغة القوانين الطبيعية العامة) مهما كانت حالتها من الحركة . ولا يمكن الآن الاحتفاظ بهذه الصورة لأن استعمال مجموعات الإسناد الجاسئة على الطريقة التى اتبعت فى النظرية النسبية الخاصة لم يعد مستطاعاً بوجه عام لوصف الزمان – مكان فلابد من استبدالها بمجموعات إحداثيات جاوس . والنص التالى يعبر عن الفكرة الأساسية فى مبدأ النسبية العامة . «كل مجموعات إحداثيات جاوس متكافئة من حيث ملاءمتها لصياغة القوانين الطبيعية العامة » .

ونستطيع أيضاً أن نضع مبدأ النسبية العامة هذا على نحو جديد آخر يجعله أسهل فهماً حتى عما لو اعتبرناه امتداداً طبيعياً لمبدأ النسبية الخاص . فتبعاً لنظرية النسبية الخاصة كانت المعادلات التى تعبر عن القوانين

الطبيعية العامة فيما قبل النسبية هى نفس المعادلات النسبية بشرط أن نحل المتغيرات الزمكانية سَ ، صَ ، شَ ، زَ لمجموعة الإسناد الجديدة مَ محل المتغيرات الزمكانية س ، ص ، ش ، ز لمجموعة الإسناد الجاليلية م وذلك باستخدام تحويل لورنتز . أما تبعاً لمبدأ النسبية العام من الناحية الأخرى فيجب أن تحتفظ المعادلات بنفس الشكل عندما نطبق البديلات التحكمية للمتغيرات الجاوسية س١ ، س٢ ، س٣ ، س٤ . وذلك لأن كل تحويل (وليس تحويل لورنتز فقط) يقابل الإنتقال من مجموعة ما من إحداثيات جاوس إلى أخرى .

وإذا أردنا أن نتمسك بنظرتنا القديمة ثلاثية الأبعاد إلى الأشياء فإننا نستطيع أن نصف التجديد أو التقدم الذى تناول الفكرة الأساسية لنظرية النسبية العامة على النحو التالى : إن نظرية النسبية الخاصة تتعلق بالحيز الجاليلى أى المناطق التى لا يوجد بها مجال جاذبى وفى هذه الحالة يستخدم كمجموعة إسناد مجموعة جاليلية أى جسم جاسىء حالته من الحركة مختارة بحيث ينطبق عليها قانون جاليليو لحركة نقطة مادية منعزلة ، أى حركة منتظمة فى خط مستقيم . وبعض الاعتبارات توحى بأننا يحسن بنا أن نرجع أو نسند نفس الحيزات الجاليلية إلى مجموعات إسناد لا جاليلية أيضاً وعندئذ نجد مجالا جاذبياً من نوع خاص بالنسبة إلى هذه المجموعات (انظر الفصل العشرين والثالث والعشرين) .

ولكن شيئاً مثل الأجسام الجاسئة ذات الخواص الإقليدية لا وجود له

فى المجالات الجاذبية وهكـذا لا محل فى نظرية النسبية العامـة لمجموعات الإسناد الجاسئة الخيالية هذه . وكذلك حـركة الساعات . إنها تتأثر أيضاً بمجال الجاذبيـة بحيث يصبح تحديد الزمن فـيزيائياً ويتم مبـاشرة بوساطة الساعات أقل قبولاً عما كان فى نظرية النسبية الخاصة .

ولهذا السبب نستعمل مجموعـات إسناد غير جاسئة لا تتحرك ككل بأى شكل كـان فحـسب بل تعانى تغـيرات فـى الشكل على هواها أثناء حركتها وتستـعمل لتحديد الزمن ساعات لا قيد على قانون حـركتها فهو كيفما اتفق مهما كان شاذاً ، ويجب علينا أن نتصور كلا من هذا الساعات مثبتة فى نقطة من مجموعة الإســناد غير الجاسئة بشرط واحد فقط هو أن تكون القراءات التى تحددها الساعات المتجاورة فى لحظة واحدة مختلفة عن بعضها البعض بقدر ضئيل جداً ، وهذه المجموعة غير الجاسئة والتى يمكن أن نسميها بحق مجموعـة إسناد رخوية هى فى الأصل ما يكافىء مجموعة إحداثيـات جاوس رباعيـة الأبعاد التى نختـارها بطريقة تحكميـة . إن ما يجعل الرخويات أقرب تصورا من مجموعة إحداثيات جاوس هو (ولو أنه لا يوجد مـبرر حـقيقـى لذلك) الأثر الشكلى العالق بأذهاننا عـن الكيان المنفصل لإحداثيات المكان فى مـواجهة إحداثى الزمن . إن كل نقطة على المجموعة الرخوية تعالج على اعـتبارها نقطة مكان وكل نقطة مادية ساكنة بالنسبة لها تـعتبر ساكنة مادمنا نعتـبر القوقعة الرخوة مـجموعة إسناد . ويقضى مـبدأ النسبية الـعامة بأن جميع هـذه الرخويات يمكن استخـدامها

كمجموعة إسناد لها نفس الحقوق ونفس الأهلية فى صياغة القوانين العامة للطبيعة . أما القوانين نفسها فيجب أن تكون مستقلة تماماً عن اختيار المجموعة الرخوية .

إن القوة الهائلة التى ينطوى عليها مبدأ النسبية العامة تكمن فى التحديد الشامل الذى يفرض على قوانين الطبيعة تبعاً لما رأينا آنفاً .

الفصل التاسع والعشرون
حل مشكلة الجاذبية على أساس المبدأ العام للنسبية

أن القارىء الذى استوعب فى أناة وروية كل ما قدمنا من الاعتبارات لن يجد صعوبة ما فى فهم الوسائل المؤدية إلى حل مشكلة الجاذبية .

دعنا نبدأ أولاً بتأمل حيز جاليلى أى حيز خالى من المجال الجاذبى بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الجاليلية م . ونحن نعلم من نظرية النسبية الخاصة على أى نحو تسلك قضبان القياس والساعات بالنسبة إلى هذه المجموعة م وهو يشبه سلوك النقطة المادية المعزولة وهذه تتحرك بحركة منتظمة فى خط مستقيم .

ثم دعنا الآن نسند هذا الحيز إلى مجموعة إحداثيات جاوسية أيا كانت أو إلى مجموعة رخوة على اعتبار أنها مجموعة إسناد ولنسمها مَ . عندئذ يكون هناك بالنسبة إلى مَ مجال جاذبى ح (من نوع خاص) ونستطيع أن نقف على كيفية سلوك قضبان القياس والساعات وكذلك النقط المادية التى تتحرك بلا قيد بالنسبة إلى مجموعة الإسناد وذلك

بوساطة التحويل الرياضى ببساطة . ونحن نفسر هذا السلوك بأنه سلوك الساعات وقضبان القياس والنقط المادية تحت تأثير المجال الجاذبى ح . وعند ذلك دعنا نفترض أن أثر المجال الجاذبى على قضبان القياس والساعات والنقط المادية التى تتحرك بحرية يستمر وفقاً لنفس القوانين حتى فى حالة ما إذا كان المجال الجاذبى السائد لا يمكن اشتقاقه من الحالة الجاليلية الخاصة بمجرد تحويل الإحداثيات .

والخطوة التالية لذلك هى أن نبحث السلوك الزمكانى للمجال ح الذى اشتق من الحالة الجاليلية الخاصة بمجرد تحويل الإحداثيات . ويصاغ هذا السلوك فى قانون يكون دائماً صحيحاً مهما كان اختيار مجموعة الإسناد الرخوة التى يتم الوصف بالنسبة إليها . وليس هذا القانون مع ذلك هو القانون العام للمجال الجاذبى ما دام المجال الجاذبى الذى وصفناه هنا موضع الاعتبار من نوع خاص .

ومتى أمكن أن نهتدى إلى القانون العام للمجال الجاذبى يظل واجباً علينا أن نحصل على تعميم للقانون الذى حصلنا عليه آنفا ، ولن يكون هذا بالأمر العسير لو أننا وضعنا نصب أعيننا المطالب التالية :

(ـ أ) يجب أن يتفق التعميم المطلوب مع الفرض العام للنسبية .

(ب) إذا كان فى الحيز موضوع البحث أية مادة فإن كتلتها القصورية فقط وبالتالى طاقاتها حسب الفصل الخامس عشر هى التى توضع موضع الاعتبار لأنها هى التى يتسبب عنها المجال وهى التى تبعثه .

(جـ) يجب أن يحقق المجال الجاذبى والمادة معاً قانون بقاء الطاقة (والدفع)

وأخيراً فإن المبدأ العام للنسبية يسمح لنا بأن نحدد أثر المجال الجاذبى على مجرى كل تلك العمليات التى تحدث وفقاً لقوانين معلومة فى حالة غياب المجال الجاذبى ، أى تلك التى سبق أن دخلت فى إطار نظرية النسبية الخاصة ، ولبيان هذا الأثر نتبع من حيث المبدأ نفس الطريقة التى سبق أن شرحناها بالنسبة إلى قضبان القياس والساعات والنقط المادية التى تتحرك بحرية .

ونظرية الجاذبية التى اشتقت بهذه الطريقة من الفرض العام للنسبية لا تبن غيرها بالنسبة لجمالها ولا من حيث تغلبها على النقص الذى تنطوى عليه الميكانيكا الكلاسيكية والذى أوضحناه فى الفصل الحادى والعشرين، ولا من حيث تفسيرها للقانون التجريبى لتساوى كتلة القصور وكتلة الجاذبية فحسب بل لأنها فوق كل هذا قد نجحت فى تفسير ظاهرة فلكية عجزت عن تفسيرها الميكانيكا الكلاسيكية .

إننا إذا قصرنا تطبيق النظرية على الحالة التى يكون فيها المجال الجاذبى صغيرة والتى تتحرك فيها الكتل بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات بسرعات ضعيفاً مقارنة لسرعة الضوء فإننا نحصل كتقريب أول على نظرية نيوتن . وهكذا نحصل هنا على هذه النظرية دون حاجة إلى أية فروض خاصة فى حين أن نيوتن اضطر إلى إدخال الفرض الذى ينص على أن التجاذب بين نقطتين متجاورتين يتناسب عكسياً مع مربع المسافة

بينهما . وإذا راعينا منتهى الدقة فى التقديرات الحسابية ظهرت الانحرافات والفروق مع نظرية نيوتن ولو أن هذه الفروق جميعها مما لا يمكن اختباره عملياً نظراً لضآلتها المتناهية .

ومع ذلك يجب أن نتوقف قليلاً لنتأمل بإمعان أحد هذه الفروق ، فتبعاً لنظرية نيوتن يتحرك أى كوكب حول الشمس فى قطع ناقص يحتفظ دائماً بموضعه بالنسبة للنجوم الثابتة لو أننا أهملنا حركة النجوم الثابتة نفسها وتأثير الكواكب الأخرى محل الاعتبار . وهكذا إذا صححنا حركة الكواكب الظاهرة وفقا لهذين المؤثرين وإذا كانت نظرية نيوتن صحيحة تماماً وجب أن نحصل على قطع ناقص كمدار للكواكب يكون ثابتاً بالنسبة إلى النجوم الثابتة . وهذا الاستنتاج الذى يمكن التحقق منه بدقة عظيمة كانت غاية ما يمكن بلوغه من الدقة فى حينها ، أمكن التحقق منه بالنسبة إلى كل الكواكب إلا واحداً هو عطارد أقرب الكواكب إلى الشمس فقد أصبح معروفا منذ أيام لوفرييه أن القطع الناقص الذى يمثل مدار عطارد بعد تصحيحه وفقاً للمؤثرين آنفى الذكر ليس ثابتاً بالنسبة إلى النجوم الثابتة بل إنه يدور دوراناً بطيئاً جداً فى مستوى المدار على مثال الحركة المدارية . وكانت القيمة التى حصلنا عليها لهذه الحركة الدورانية للقطع الناقص المدارى تبلغ ٤٣ ثانية من القوس فى القرن وقد تأكد صدق هذا التقدير إلى حدود ثوان قليلة من القوس ، ويمكن إيجاد تفسير مقبول لهذا الأثر تبعاً للميكانيكا الكلاسيكية بشرط التسليم بفروض ضعيفة الاحتمال وضعت خصيصاً لهذا الغرض .

ولكنه وجد على أساس نظرية النسبيـة العامة أن كل القطوع الناقصة التى تدور فيها الكواكب حـول الشمس يجب أن تدور بنفس الطريقة آنفة الذكـر وأن مقدار هـذا الدوران بالنسبـة إلى كل الكواكب ما عـدا عطارد أصغر من أن يمكن اكتشـافه بالوسائل الراهنة ولكنه فى حالة عطارد لابد أن يبلغ ٤٣ ثانيـة من القوس فى القـرن وهى نتيـجة تتفق أتم اتـفاق مع التجربة .

وبخـلاف هذا أمكن الوصـول إلى استنتـاجين آخـرين فـقط يمكن وضعهمـا موضع الاختبار ليـشهدا لها وهما انحناء أشعـة الضوء بوساطة مجال جاذبية الشمس[1] وانتقـال موضع خطوط الطيف فـى الضوء الذى يصل إلينا من النجوم الكبيـرة بالمقارنة بموضع نفس هذه الخطوط للأضواء التى يمكن إنتاجها بطريقة مشابهة على الأرض (أى بوساطة نفس الذرة)[2] وقد تأيد هذان الاستنتاجان اللذان استنتجا نظرياً من النظرية النسبية العامة بالبرهان العملى .

---

(١) كان ادنجتون وآخرون أول من رصدوا ذلك فى سنة ١٩١٩ (انظر الملحق ٣) .

(٢) حقق ذلك آدمز سنة ١٩٢٤ (انظر الملحق ٣) .

الجزء الثالث

تأملات فى الكون ككل

الفصل الثلاثون
الصعوبات الكونية فى نظرية نيوتن

تنطوى ميكانيكا الأجرام السماوية على مشكلة أساسية أخرى بخلاف المشكلة التى سبق مناقشتها فى الفصل الحادى والعشرين . وقد كان الفلكى سيلجر - فيما أعلم - هو أول من تعرض لدراستها بتوسع وتفصيل . وهذه المشكلة هى موضوع الكون ككل وكيف يجب النظر إليه . إن أول ما يتبادر إلى الذهن هو أن الكون من حيث المكان (والزمان) لا نهائى فهناك نجوم فى كل أجزاء الفضاء بحيث تصبح كثافة المادة ولو أنها شديدة التباين فى تفصيلاتها واحدة فى المتوسط فى كل الفضاء أو بعبارة أخرى فإننا إينما نذهب أو مهما ابتعدنا فى تجوالنا فى الفضاء سنجد فى كل مكان حشوداً مخففة من النجوم الثابتة واحدة النوع والكثافة تقريباً .

ولا تتفق هذه النظرية مع نظرية نيوتن إذ يستوجب هذا أن يكون للكون ما يشبه المركز تبلغ كثافة النجوم فيه أقصاها ثم تأخذ فى التناقص كلما ابتعدنا عن المركز إلى أن - وذلك بعد أبعاد شاسعة - تتلاشى

ليتلوها فراغ لا نهائى[1] . إن الكون النجمى لابد أن يكون جزيرة منتهية فى محيط لا نهائى من الفضاء.

وهذا التصور للكون ليس مرضياً تماماً فى حد ذاته وهو أقل قبولا لأنه يضطرنا إلى التسليم بأن الضوء الذى ينبعث من النجوم وكذلك أفراد من المجموعة النجمية تخرج باستمرار إلى الفضاء اللانهائى دون رجعة وبحيث لا تعود إلى تبادل التأثير على موجودات الطبيعة الأخرى . إن مثل هذا الكون المادى المنتهى محتوم عليه أن يتلاشى تدريجياً وبانتظام .

ولتفادى هذا العيب اقترح سيلجر تعديلا لقانون نيوتن يفرض فيه أنه فى حالة المسافات الشاسعة تتناقص قوة الجذب بين كتلتين بأسرع مما تتناقص به هذه القوة تبعاً لقانون عكس المربع . وبهذه الطريقة يصبح ممكنا أن يظل متوسط كثافة المادة ثابتاً فى كل مكان حتى فى اللانهاية . وهكذا نتخلص من تلك الفكرة السقيمة التى تحتم أن يكون للكون شيء

---

(١) البرهان على ذلك : تتناسب تبعا لنظرية نيوتن خطوط القوى التى تأتى من مالا نهاية وتنتهى فى الكتلة ك مع الكتلة ك وإذا كان متوسط كثافة المادة ث فى الكون ثابتا فان كرة حجمها ح ستحتوى على متوسط كتلة ح ث وهكذا يصبح عدد خطوط القوى التى تمر خلال السطح س - وهو سطح الكرة - إلى داخلها متناسب مع ث ح وهكذا يتناسب عدد خطوط القوى التى تمر من وحدة مساحات سطح الكرة إلى داخلها مع (ث $\frac{ح}{س}$) أو (ث نق) وعلى ذلك تصبح أخيرا شدة المجال على سطح الكرة مع ازدياد نصف قطر الكرة لا نهائية وهذا أمر مستحيل .

فى طبيعة المركز . ومن الطبيعى أننا هنا نتفادى ذلك العيب السالف الذكر ولكن بثمن باهظ هو تعديل قانون نيوتن وتعقيده دون أن يكون لهذا التعديل أى أساس نظرى أو تجريبى يستند إليه . إننا نستطيع أن نتخيل عدداً لا حصر له من القوانين التى تؤدى نفس الغرض ولسنا ندرى أيها يجب أن نفضله لأن أياً من هذه القوانين سيستند إلى نفس العدد الضئيل من المبادىء النظرية العامة مثلما يستند قانون نيوتن .

الفصل الحادى والثلاثون
إمكان وجود كون منته ولكنه غير محدود

ولكن الآراء فى بناء الكون تسير أيضا فى اتجاه آخر جد مختلف . فقد دفع بنا تقدم الهندسة اللاإقليدية إلى التسليم بأننا نستطيع أن نلقى الشك على لا نهائية الفضاء حولنا دون أن نرتكب ما يخالف قوانين الفكر أو التجربة (ريمان . هلموهولتز) ولقد عالج تفاصيل هذه المسائل بوضوح لا مزيد عليه كل من هلموهولتز وبوانكاريه ، بينما لا أملك هنا إلا أن أشير إليها فى إيجاز شديد .

دعنا نتخيل أولا عالماً ثنائى الأبعاد . كائنات مفرطحة وكل ما يتعلق بها مفرطح خصوصاً أدوات قياس مفرطحة جاسئة وهذه كلها حرة التحرك فى «مستوى» وبالنسبة إلى هذه الكائنات لا وجود لشىء خارج المستوى إن كل ما يمكن أن يحدث لها أو لمتعلقاتها المفرطحة سيكون محصوراً حتماً فى المستوى الذى هو بمثابة الحقيقة الشاملة بالنسبة لها وعلى الأخص سيكون مستطاعاً هنا تنفيذ إنشاءات الهندسة الإقليدية - أى مثل تلك الإنشاءات الشبكية التى ناقشناها فى الفصل الرابع والعشرين بوساطة أشرطة القياس ، وسيكون عالم هذه الكائنات على عكس عالمنا ثنائى

الأبعاد ولكنه مثل عالمنا يمتد إلى ما لا نهاية . إن فى عالمها متسع لعدد لا نهاية له من المربعات المكونة من قضبان القياس أى أن حجمه (سطحه) لا نهائى . وإذا قالت هذه الكائنات إن عالمها مستو فإنها تصدق لأنها تعنى بذلك أنها تستطيع تنفيذ إنشاءات الهندسة الإقليدية بأعواد قياسها التى تمثل على الدوام نفس المسافة مهما اختلفت مواضعها .

دعنا الآن نتأمل عالما آخر ثنائى الأبعاد ولكنه هذه المرة على سطح كروى بدلا من أن يكون على سطح مستو . إن الكائنات المفرطحة وقضبان قياسها ومتعلقاتها الأخرى تتلاءم جيدا مع هذا السطح . ولا تستطيع هذه الكائنات أن تعتبر هندسة عالمها هندسة مستوية وقضبان القياس التى معها تحقيقاً للمسافة . . . ؟

إنها لا تستطيع ذلك لأنها إذا حاولت أن تقيم خطاً مستقيماً فإنها ستحصل على منحنى منطو على نفسه ذى طول معين منته يمكن قياسه بوساطة قضبان القياس . وبالمثل نجد أن لهذا مساحة منتهية يمكن مقارنتها بمساحة مربع مكون من قضبان القياس ، وروعة هذا المثل الذى نسوقه تكمن فى أنه يوضح لنا أن « كون هذه الكائنات منته غير محدود » .

ولكن الكائنات التى تعيش على سطح الكرة ليست بحاجة إلى أن تدور حول العالم فى رحلة لكى تتبين أنها لا تعيش فى كون إقليدى . إنها تستطيع أن تجد الدليل على ذلك فى كل جزء من أجزاء «عالمها» ما دامت لا تتقيد بجزء ضئيل منه . فإذا أخذت فى رسم خطوط مستقيمة

(وهى أقواس من دوائر بالنسبة لنا أصحاب الفضاء ثلاثى الأبعاد) متساوية الطول ابتداء من نقطة واحـدة وفى جميع الاتجـاهات فإنها ستـسمى الخط الذى يربط نهـايات هذه المستـقيمـات دائرة وعلى السطح المستـوى تكون النسبة بين مـحيط الدائرة ونصف قطرها إذا قيس الطولان بقـضيب واحد من قضبـان القياس ثابتة تبعـاً لهندسة إقليدس المستـوية ومقدارها ط وهذا المقدار مستقل عن طول قطر الدائرة ولكن مخلوقـاتنا المفرطحة ستجد لهذه النسبة المقدار :

$$\text{ط} \; \frac{\text{جا}\left(\frac{\text{نق}}{\text{نق}}\right)}{\frac{\text{نق}}{\text{نق}}}$$

أى أصغـر قليلا من ط . ويزداد الفرق كلمـا زاد نصف قطر الدائرة بالنسبـة إلى نصف القطر **ث** « لكرة العـالم» . وبوساطة هذه العـلاقة تستطيع المخلوقات الكروية أن تحدد نصف قطر كـونها « عالمها » ولو كان جزء صـغير نسبـياً من كرة عالمهـا هو الذى يمكن أن تتناوله قياسـاتها . ولكن إذا كان هذا الجزء صغيراً جـداً حقاً فسوف لا تستطيع هذه الكائنات أن تثبت أنـها على « عالم » كـروى لا على مسـتوى إقليـدى لأن الجزء الصـغيـر جداً من سطح الكرة لا يخـتلف إلا قليـلا عن سطح المستـوى المساوى له فى الإتساع .

وهكذا إذا كانت المخلوقات التى تعيش على سطح كروى تعيش على كوكب لا تشغل مجموعته الشمسية إلا قدراً ضئيلاً من الفضاء الكروى لن يكون فى مقدورها أن تعرف إن كانت تعيش فى كون متنه أم لا نهائى لأن « الجزء من الكون » الذى تتناوله أرصاد وأبحاث هذه الكائنات مستوى عملياً فى كلتا الحالتين أى إقليدى . ويتبع ذلك مباشرة أنه بالنسبة للكائنات التى على سطح كروى يتزايد محيط الدائرة أولا تبعا لنصف القطر حتى يصل إلى محيط الكون ولكن إذا استمر نصف القطر فى الازدياد يأخذ عند ذلك المحيط فى التناقص حتى يصل إلى الصفر .

وأثناء هذه العملية تستمر مساحة الدائرة فى الازدياد أكثر فأكثر إلى أن تصبح مساوية للمساحة الكلية لكل « كرة العالم » .

ربما تعجب القارىء لماذا وضعنا « كائناتنا » على كرة لا على أى شكل آخر مغلق . إن لهذا الاختيار سبباً يبرره يتلخص فى أن الكرة من بين كل الأشياء المغلقة الأخرى تنفرد بأن جميع النقط التى عليها متكافئة . إننى أسلم بأن النسبة بين محيط الدائرة ح ونصف قطرها ث تتوقف على نصف قطرها ث ولكن فيما يتعلق بالقيمة الواحدة لنصف القطر تكون هذه النسبة واحدة بالنسبة إلى جميع النقط التى على سطح « العالم » أو بعبارة أخرى إن كرة العالم سطح ثابت الانحناء .

ويوجد « لكرة العالم » ثنائية الأبعاد هذه مثل ثلاثى الأبعاد هو الفضاء الكروى ثلاثى الأبعاد الذى أكتشفه ريمان ، كل نقطة متكافئة

أيضاً وله حجم منتـه يحدده « نصف قطره » (٢ ط^{٢} نق^{٣}) . ولكن هل من الممكن تصور فضاء كـروى . . . ؟ إن تصور أى فضاء لا يعنى سوى أن نتـصـور ملخص تجربتنا فـيه ، أى التـجربة التى نحـصل عليهـا فـى حـركة الأجسـام «الجـاسـئة» وعلى هـذا النحو نستطيع أن نتصـور الفضاء الكروى .

تصـور أننا نرسـم خطوطا أو نمد أوتاراً من نقطـة مـا إلى جـمـيع الأتجاهات ثـم نضع علامـة على كل من هذه الخطوط أو هذه الأوتار على بعد ث من النقطة بوساطة قضيب قياس .

إن كل نهـايات هذه الخطوط أو الأوتار عند هذه العلامـات تقع على سطح كروى ونستطيع على الأخص أن نقـيس المسافة ف على هذا السطح الكروى بوساطة مربع مكون من قضبان القياس فإذا كان الكون أقليديا فإن مساحة السطح تساوى ف = ٤ ط نق^{٢} وإذا كان كروياً تكون أقل دائما من ٤ ط نق^{٢} وكلما زادت قـيمة نق زادت ف على الصفـر إلى أن تصل حد أقصى يـحدده « نصف قطر العـالم » ولكن إذا زادت قيـمة ث أكثر من ذلك أخذت المساحة فى التناقص تدريجيـاً إلى أن تصل أخيراً إلى الصفر . إن الخطوط الخارجية من نقطة الابتداء تبتعد عن بعضها البعض فى أول الأمر أكثر فأكثر ثم تتقارب بعد ذلك وأخيراً تجرى معا مرة ثانية فى نقطة مقـابلة لنقطة الابتـداء . وفى هذه الظروف تكون قد عـبرت كل الفـضاء الكروى . وهكذا يبدو بسهـولة أن الفضاء الكروى الثلاثى الأبعـاد يشبه

الفضـــاء الكروى ثنائى الأبعاد ، إنه منته (أى منتـهى الحجم) وليس له حدود تحده .

ويحسن أن نذكر أنــه يوجد نوع آخر من الفضاء المنحــنى هو الفضاء الناقصى ، الذى يمـكن اعتبــاره فضاء منحنيــاً ، النقطتان المتـقابلتان فــيه متطابقتان ، أى لا يمكن التــمييز بينهما بل تامــتا التماثل ، وهكذا يمكن اعتبار الكون الناقصى إلى حد ما كوناً منحنياً له تماثل مركزى .

مما تقدم يتضح أنه من الممكن إدراك الفضاءات المقفولة التى ليس لها حد يحدها ومن بينها يعد الفضاء الكروى والفضاء الناقصى أكثرها بساطة لأن جميع نــقط أى هذين الفضائين متكافــئة . وكنتيجــة لما تقدم ينهض أمام الفلكيين وعلمــاء الفيزياء سؤال على جانب عظــيم من الأهمية : هل الكون الــذى نعــيش فيه لا نهــائى أو أنه منته على نحــو الكون الكروى . . . ؟ إن تجــاربنا أقل جداً مــن أن تسمح لنا بالإجــابة عن هذا الســؤال ولكن نظرية النسبية العامة تسمح لنا أن نجيب عنه بقدر معقول من التأكيد وهكذا تجد المشكلة التى قابلتنا فى الفصل الثلاثين حلا لها .

الفصل الثانى والثلاثون

بناء الفضاء تبعاً للنظرية النسبية العامة

ليست الخواص الهندسية للفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة مستقلة عن المادة بل إن المادة تحدد هذه الخواص . وعلى ذلك لاسبيل لنا إلى دراسة البناء الهندسى للكون ما لم يتوافر لنا مقدماً معرفة حالة المادة فيه كأساس لدراستنا . ونحن نعرف بالتجربة أن سرعات النجوم بالنسبة إلى مجموعة إسناد مناسبة ، صغيرة جداً إذا ما قورنت بسرعة انتشار الضوء . وعلى ذلك نستطيع على وجه التقريب أن نصل إلى رأى عن طبيعة الكون ككل لو عالجنا المادة باعتبارها ساكنة .

ونحن نعلم كما رأينا فى الفصول السابقة أن سلوك قضبان القياس والساعات يتأثر بالمجالات الجاذبية أى بتوزيع المادة وهذا فى حد ذاته يكفى لاستبعاد احتمال أن تكون هندسة الكون إقليدية . ولكنه أمر ميسور الفهم أن الكون الذى نعيش فيه لا يختلف إلا قليلا عن الكون الإقليدى وهذه الفكرة تبدو أكثر احتمالا ما دامت التقديرات الحسابية تظهر أن قياسات الفضاء المحيط بالمادة لا تتأثر إلا تأثيراً ضعيفاً حتى من أجسام بمثل كتلة الشمس . ويمكن أن نتخيل أن الكون من الناحية الهندسية يسلك سلوك

سطح منحن بغير انتظام فى أجزائه الفردية دون أن يبتعد كثيراً فى أى مكان فيه عن المستوى . إنه يبدو كسطح بحيرة متموج ، وكون كهذا يمكن أن يقال عنه إنه شبه إقليدى وإنه من حيث فضاؤه لا نهائى . ولكن التقديرات الحسابية تظهر أن كثافة المادة فى كون شبه إقليدى لابد أن تكون صفراً . وهكذا لا يمكن أن يكون مثل هذا الكون مأهولا بالمادة فى كل أجزائه ، إنه سيعيد أمامنا الصورة غير المرضية التى رسمناها فى الفصل الثلاثين .

فإذا كان لابد أن يكون للمادة فى الكون متوسط كثافة يختلف عن الصفر مهما كان هذا الاختلاف ضئيلا فلابد إذا أن يكون الكون غير إقليدى ولا حتى شبه إقليدى ، وعلى العكس تثبت نتائج التقديرات الحسابية أنه إذا انتظم توزيع المادة فإن الكون يكون بالضرورة كروياً (أو ناقصاً) ولما كان توزيع المادة تفصيلا فى الحقيقة ليس منتظماً فإن الكون الحقيقى سينحرف فى أجزائه الفردية عن الكروى أى أن الكون سيكون شبه كروى ولكنه سيكون بالضرورة منتهياً . ولكن النظرية تمدنا فى الواقع بعلاقة[1] بسيطة بين التمدد الفضائى للكون ومتوسط كثافة المادة فيه .

---

(١) لنصف القطر نق للكون على المعادلة $نق^{٢} = \frac{٢}{هـ\ ث}$ وإذا استخدما النظام سم. جرام. ثانية للقياس فى هذه المعادلة حصلنا على $\frac{٣}{هـ} = ١,٠٨ \times ١٠^{٢٧}$ حيث ث هو متوسط كثافة المادة ، هـ ثابت متعلق بثابت نيوتن للجاذبية .

الملاحـــق

١ - اشتقاق بسيط لتحويل لورنتز .

٢- فضاء منكوفكس رباعى الأبعاد « عالم » .

٣- التأييد التجريبى لنظرية النسبية العامة .

٤- بناء الفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة .

٥- النسبية ومشكلة الفضاء .

الملحق الأول

اشتقاق بسيط لتحويل لورنتز

(تكملة للفصل الحادى عشر)

يجب أن نراعى أن يتطابق باستمرار المحوران السينيان لكل من مجموعتى الإحداثيات الموضحتين فى شكل - ٢ - . وبذلك يتم بعض التوجيه النسبى لهما . وفى الحالة الحاضرة نستطيع أن نجزىء المسألة إلى أجزاء بأن نضع محل الاعتبار أولا الحوادث التى تقع على المحاور (س) فقط . فأى هذه الحوادث يمثلها بالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات (م) الإحداثى س و الزمن ز . وبالنسبة إلى مجموعة الإحداثيات (مَ) الإحداثى سَ والزمن زَ وعلينا أن نجد سَ ، زَ إذا كنا نعلم س ، ز .

إن أية إشارة ضوئية تنتقل على طول المحور الإيجابى س تنتشر وفقاً للمعادلة س = حـ ز .

أى س - حـ ز = صفر (١)

ولما كانت نفس الإشارة الضوئية يجب أن تنتشر بالنسبة إلى مَ بالسرعة حـ فعلى ذلك سيكون انتشار الضوء بالنسبة إلى المجموعة مَ وفق المعادلة المماثلة

س - حـ ز = صفر. (٢)

إن تلك النقط الزمكانيـة (الحوادث) التى تحقـق المعادلة (١) لابد أن تحقق المعـادلة (٢) أيضاً . وواضح أن هذا يتحقق عندمـا تتحقق عـموماً العلاقة . (سَ - حـ زَ) = ت (س - حـ ز) (٣)

حيـث تشير ت إلـى ثابت . لأنـه تبعاً للمعادلة (٣) نجد أن اختفاء (سَ - حـ زَ) يتضمن اختفاء (سَ - حـ زَ) .

وإذا أجرينا المثل على أشعة الضوء التى تنتشر على المحور السلبى س نحصل على الحالة .

(سَ - حـ زَ) = ث (س - حـ ز) (٤)

وإذا جمـعنا (أو طرحنا) المعـادلات (٣) ، (٤) وأحللنا للسهـولة الثوابت أ ، ب محل الثوابت ت ، ث بحيث تكون :

$$\text{أ} = \frac{\text{ت} + \text{ث}}{٢}$$

$$\text{ب} = \frac{\text{ت} - \text{ث}}{٢}$$

نحصل على المعادلات

سَ = أ س + ب حـ ز

حـ زَ = أ حـ ز - ب س
(٥)

وهكذا يجب أن نحصل على حل المشكلة لو كنا نعلم الثوابت أ ، ب : وهذه الثوابت يمكن معرفتها تبعا لمايلى :

بالنسبة إلى أصل مَ يكون لدينا على الدوام سَ = صفر

وعلى ذلك يكون تبعاً للمعادلة الأولى من المعادلات (٥)

$$سَ = \frac{ب\,حـ}{أ}\ ز$$

وإذا رمزنا بالرمز ع إلى السرعة التى يتحرك بها أصل مَ بالنسبة إلى م يكون :

$$ع = \frac{ب\,حـ}{أ} \qquad (٦)$$

ونفس القيمة ع يمكن الحصول عليها من المعادلات (٥) إذا حسبنا سرعة نقطة أخرى من مَ بالنسبة إلى م أو السرعة (الموجهة نحو المحور السينى السلبى) لنقطة على م بالنسبة إلى مَ . وباختصار نستطيع أن نسمى ع السرعة النسبية للمجموعتين .

وفوق ذلك فإن مبدأ النسبية يعلمنا أن طول وحدة القياس الساكنة بالنسبة إلى مَ كما يبدو لراصد على م يجب أن يكون هو نفس طول وحدة القياس الساكنة بالنسبة إلى م كما يبدو لراصد على مَ . ولكى نرى كيف تظهر نقط المحور سَ لراصد على م فإننا نحتاج فقط إلى التقاط صورة خاطفة (لقطة سريعة) للمجموعة مَ من المجموعة م . ومعنى هذا

أنه يجب علينا أن ندخل قيمة خاصة ز (ز من م) أى ز = صفر ولهذه القيمة من ز نحصل من المعادلة الأولى (٥) على :

$$س' = أ س$$

وعلى ذلك تكون النقطتان اللتان تفصلهما على المحور س المسافة ∆ س = ١ مقيسة فى المجموعة م' مفصولتين فى اللقطة الخاطفة أو الصورة اللحظية بالمسافة :

$$\Delta س = \frac{١}{أ} \qquad (٧)$$

ولكن إذا أخذت اللقطة السريعة من م' (ز' = صفر) وإذا استبعدنا زمن المعادلات (٥) وأدخلنا فى اعتبارنا التعبير (٦) حصلنا على :

$$س' = أ \left(١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢} \right) س$$

ومن هذا نستخلص أن نقطتين على المحور س تفصلهما المسافة أ (بالنسبة إلى م) سيمثلهما فى الصورة الخاطفة التى أخذناها المسافة :

$$\Delta س' = أ \left(١ - \frac{ع^٢}{حـ^٢} \right) \qquad (٧ أ)$$

ولكن لابد تبعاً لما تقدم ذكره أن تكـون الصورتان متـماثلتين وعلى ذلك لابد أن تكون ئ س فى (٧) متساوية مع ئ سَ فى (٧أ) بحيث نحصل على :

$$أ^{٢} = \frac{١}{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}} \qquad (٧\ ب)$$

والمعادلتـان (٦) ، (٧ ب) تحددان الثابتين أ ب . وإذا أدخلنا قيـمة هذين الثـابتين فى (٥) نحصل على المعـادلة الأولى والرابعة اللتـين سبق ذكرهما فى الفصل الحادى عشر .

$$\left.\begin{aligned} س &= \frac{س - ع\ ز}{\sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}} \\ ز &= \frac{ز - \frac{ع}{حـ^{٢}}\ س}{\sqrt{١ - \frac{ع^{٢}}{حـ^{٢}}}} \end{aligned}\right] \qquad (٨)$$

وهكذا حصلنا على تحويل لورنتز بالنسبة إلى الحوادث على المحور س وهو يحقق الشرط :

$$سَ^{٢} - حـ^{٢}\ زَ^{٢} = س^{٢} - حـ^{٢}\ ز^{٢} \qquad (٨\ أ)$$

وامتداد هذه النتيجة ليشمل الحوادث التى تقع خارج المحور س يمكن الحصول عليه بالاحتفاظ بالمعادلات (٨) وتزويدها بالعلاقات :

$$\left. \begin{array}{l} \text{ص}' = \text{ص} \\ \text{ش}' = \text{ش} \end{array} \right] \qquad (٩)$$

وبهذه الطريقة تحقق الفرض الذى ينص على أن سرعة الضوء ثابتة فى الفراغ (مهما كان اتجاه اشعته) بالنسبة إلى كلا المجموعتين م ، مَ . ويمكن توضيح ذلك كمايلى :

دعنا نتخيل أن إشارة ضوئية أرسلت من أصل م فى الوقت ز = صفر إنها سوف تنتشر تبعاً للمعادلة :

$$\text{ح} = \sqrt{\text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2} = \text{حـ ز}$$

وإذا ربعنا هذه المعادلة نجد أن الإشارة الضوئية ستنتشر تبعاً للمعادلة

$$\text{س}^2 + \text{ص}^2 + \text{ش}^2 - \text{حـ}^2 \text{ ز}^2 = \text{صفر} \qquad (١٠)$$

ويستوجب قانون انتشار الضوء مرتبطاً مع فرض النسبية أن يحدث انتقال الإشارة الضوئية – وذلك كما يبدو بالنسبة إلى المجموعة مَ – تبعاً للتعبير المناظر :

$$\text{ح}' = \text{حـ ز}'$$

أو سَ^{٢} + صَ^{٢} + شَ^{٢} − حـ^{٢} زَ^{٢} = صفر (١٠ أ)

وحتى تكون المعادلة (١٠ أ) نتيجة للمعادلة (١٠ يجب أن يكون)

سَ^{٢} + صَ^{٢} + شَ^{٢} − حـ^{٢} زَ^{٢} = ϕ

(س^{٢} + ص^{٢} + ش^{٢} − حـ^{٢} ز^{٣}) (١١)

ولما كانت المعادلة (٨ أ) يجب أن تنطبق على النقط التى على المحور س فإننا هكذا نحصل على ϕ = ١ ومن السهل أن نرى أن تحويل لورتنز يحقق فعلا المعادلة (١١) عندما تكون ϕ = ١ لأن (١١) نتيجة للمعادلات (٨ أ) ، (٩) وعلى ذلك فهى أيضا نتيجة للمعادلات ٨ ، (٩) ، وهكذا نكون قد قمنا باشتقاق تحويل لورنتز .

وتحويل لورنتز الذى تمثله المعادلتان (٨) ، (١٠) لا يزال بحاجة إلى أن يعمم . فمن الواضح أنه ليس محتما أن نختار محاور مَ بحيث تتوازى مكانياً مع محاور م ، وليس محتما أيضاً أن تكون سرعة انتقال مَ بالنسبة إلى م فى اتجاه المحور س . وإذا أمعنا الفكر قليلا نرى أننا نستطيع أن نبنى تحويل لورنتز بهذا المعنى العام من نوعين من التحويلات هما تحويلات لورنتز بالمعنى الخاص ، ومن التحويلات المكانية البحتة الأمر الذى يناظر استبدال مجموعة الإحداثيات قائمة الزوايا بمجموعة جديدة تتجه محاورها فى اتجاهات أخرى . ونستطيع رياضياً أن نصف تحويل لورنتز المعمم كمايلى :

انه يعبر عن س ، ص ، ش ، ز في حدود الدوال الخطيه المتماثله للمقادير س ، ص ، ش ، ز بشكل يجعل العلاقة :

$$\bar{\text{س}}^{2} + \bar{\text{ص}}^{2} + \bar{\text{ش}}^{2} - \text{حـ}^{2}\,\bar{\text{ز}}^{2} = \text{س}^{2} + \text{ص}^{2} + \text{ش}^{2} - \text{حـ}^{2}\,\text{ز}^{2} \quad (\text{11 أ})$$

تتحقق بذاتها . أى أننا إذا أحللنا تعبيراتها في حدود س ، ص ، ش ، ز محل $\bar{\text{س}}$ ، $\bar{\text{ص}}$ ، $\bar{\text{ش}}$ ، $\bar{\text{ز}}$ في الشق الأيسر من (١١ أ) يتفق مع الشق الأيمن عند ذلك .

الملحق الثانى

فضاء منكوفسكى رباعى الأبعاد

(تكملة الفصل السابع عشر)

من الممكن أن نحدد معالم تحويل لورنتز بطريقة أكثر بساطة مما تقدم إذا نحن أدخلنا الكمية الخيالية $\sqrt{-1}$ حـ ز محل ز كمتغير الزمن . وإذا أدخلنا متفقا مع هذا :

$$س_1 = س$$

$$س_2 = ص$$

$$س_3 = ش$$

$$س_4 = \sqrt{-1}\ حـ\ ز$$

وبالمثل للمجموعة مَ . عند ذلك يمكن التعبير عن الشرط الذى تحقق بالذات هكذا :

$$\bar{س}_1^2 + \bar{س}_2^2 + \bar{س}_3^2 + \bar{س}_4^2 = س_1^2 + س_2^2 + س_3^2 + س_4^2 \qquad (12)$$

أى أنه عن طريق هذا الاختــيار للإحداثيات تتــحول المعادلة (١١ أ) إلى هذه المعادلة (١٢) .

ونرى من المعــادلة ١٢ أن الإحداثى الزمنى الخـيالى $س_{٤}$ يدخل فى شرط التحويل بنفس الطريقــة التى تدخل بها الإحداثيات $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ونتيجــة لهذه الحقيــقة يدخل « الزمن » $س_{٤}$ تبعاً لنظرية النســبية فى القوانين الطبيعية بنفس شكل إحداثيات المكان $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$.

ولقد سمى منكوفسكى المتصل رباعى الأبعاد الذى تصفه «الإحداثيات» $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ ، $س_{٤}$ « عالماً » كمــا سمى « نقطة حادثة » « بنقطة عالم » ومن « حدوث » فى فــضاء ثلاثى الأبعاد تتحول الفيــزياء كما لو كانت « وجوداً » فى « العالم » رباعى الأبعاد .

وهذا «العالم» رباعى الأبعاد يحمل فى طيــاته تماثلا قريباً من الفضاء ثلاثى الأبعاد فى هندســة إقليدس التحــليلية . فإذا أدخلنا فى هذا الأخــير مجموعة إحداثيات كارتيزية جديدة ($\bar{س}_{١}$ ، $\bar{س}_{٢}$ ، $\bar{س}_{٣}$) بنفس الأصل فإن $\bar{س}_{١}$ ، $\bar{س}_{٢}$ ، $\bar{س}_{٣}$ تكون دوال خطية متماثلة لـ $س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$ التى تحقق بذاتها المعادلة $\bar{س}_{١}^{٢} + \bar{س}_{٢}^{٢} + \bar{س}_{٣}^{٢} = س_{١}^{٢} + س_{٢}^{٢} + س_{٣}^{٢}$.

والتماثــل مع (١٢) تماثل تام . ويمكننا أعتبار « عــالم » منكوفــسكى بطريقة شكليــة فضاءً إقليديــاً رباعى الأبعاد (له إحداثى زمانى خــيالى) ويكون تحويل لورنتز مناظراً « لدوران » مجمــوعة الإحداثيات فى «العالم» رباعى الأبعاد .

الملحق الثالث

الإثبات التجريبى لنظرية النسبية العامة

نستطيع أن نتخيل من الناحية النظرية المنظمة عملية تطور علم من العلوم الوصفية علي أنها فى الواقع عملية استقراء مستمرة . إننا نضع النظريات ونصوغها فى عبارة وجيزة . وهى تضمينات لعدد كبير من الملاحظات الفردية فى صورة قوانين وصفية . ومن هذه النظريات نستطيع تأكيد القوانين العامة عن طريق المقارنة . من هنا نرى أن نمو وتقدم علم من العلوم يشبه شبهاً كبيراً عملية وضع أو إنشاء فهرس مبوب . إنه يبدو كما لو كان أمراً وصفياً محضاً .

لكن هذا الرأى رأى ضيق الأفق فهو لا يحيط أبداً بكل نواحى العملية فى الواقع ؛ لأنه بغض النظر عن الدور الهام الذى يلعبه الحدس والفكر الاستنباطى فى نمو علم من العلوم المضبوطة . إذ بمجرد أن يخطو علم ما من هذه العلوم خطواته الأولى لا تعد خطوات تقدمه النظرى التالية تتم عن طريق مجرد التبويب ؛ لأن الباحث متأثرا بالمدلولات التجريبية يميل إلى إتخاذ منهج فكرى يعتمد منطقياً على عدد صغير من الفروض الأساسية التى تسمى بديهيات . ومثل هذا المنهج أو المذهب الفكرى

يسمى نظرية . والمبرر الوحيد لوجود النظرية هو أنها تنتظم عدداً كبيراً من المشاهدات المفردة . وفى هذا الأمر بالذات يكمن « صدق » النظرية .

وقد يقابل المجموعة المتشابكة الواحدة من المعطيات الوصفية عدة نظريات قد تختلف فيما بينها إلى حد بعيد . ولكن هذه النظريات من ناحية الاستنتاجات التى تشتق منها والتى يمكن اختبارها عملياً قد يكون الاتفاق بينها تاماً بحيث يتعذر العثور على استنتاج واحد تختلف حوله هذه النظريات . ومن أمثلة ذلك حالة مشهورة فى عالم الحياة يهتم لها الكثيرون هى نظرية داروين فى أصل الأنواع وتطورها عن طريق بقاء الأصلح فى معترك الوجود . والنظرية الأخرى فى تطور الأنواع على أساس انتقال الخواص المكتسبة وراثياً .

وهناك مثال آخر لذلك - هو الاتفاق البعيد المدى فى الاستنتاجات من نظريتين فى الميكانيكا النيوتونية من ناحية ونظرية النسبية العامة من الناحية الأخرى . وهذا الاتفاق يذهب بعيداً إلى حد أننا إلى الآن لم نعثر إلا على استنتاجات قليلة يمكن وضعها موضع البحث والاختبار ولا تؤدى إليها أيضا فيزياء ما قبل النسبية . وهذا على الرغم من الاختلاف العميق بين الفروض الأساسية للنظريتين . وسنتأمل فيمايلى مرة ثانية هذه الاستنتاجات الهامة وسنناقش الشواهد التجريبية التى حصلنا عليها إلى الآن ، والتى تتعلق بها .

(أ) حركة حضيض مسار عطارد:

يجب أن يدور الكوكب الذى يدور حول الشمس وذلك تبعاً لميكانيكا نيوتن وقانون نيوتن للجاذبية فى قطع ناقص حولها أو بعبارة أصح حول مركز الثقل المشترك للكوكب والشمس . وفى مثل هذه المجموعة تقع الشمس أو مركز الثقل المشترك فى إحدى بؤرتى القطع بحيث يأخذ البعد الشمس - الكوكب فى التزايد من حد أدنى إلى حد أقصى ثم يتناقص ثانية إلى الحد الأدنى وذلك خلال سنة كوكبية[1] ولو أننا أحللنا محل قانون نيوتن قانوناً آخر للجذب مختلفاً بعض الشيء لوجدنا فى التقدير الحسابى أن الحركة ستظل تحدث تبعاً لهذا القانون الجديد بحيث يظل البعد الكوكب - الشمس دورى التغير . ولكن فى هذه الحالة ستكون الزاوية المحصورة بين الخطين الواصلين من الشمس إلى الكوكب فى أول هذه الفترة ثم فى نهايتها (أى من حضيض - أقرب نقطة إلى الشمس - إلى حضيض تال) تختلف عن ٣٦٠ درجة ولن يكون خط المدار خطاً مقفولا بل إنه مع الزمن سيملأ جزئياً حلقياً من مستوى المدار. أعنى بين دائرة أقل بعد للكوكب ودائرة أكبر بعد له عن الشمس .

وتبعاً لنظرية النسبية العامة التى تختلف طبعاً عن نظرية نيوتن نجد أن تغييراً صغيراً عن حركة نيوتن - كبلر لكوكب ما فى مداره يجب أن

---

(١) هذا هو ما يسمى أحيانا بالأوج والحضيض .   (المترجم) .

تحدث بحيث تكون الزاوية المحصورة بين القطر الشمس - الكوكب فى الحضيض والذى يليه تزيد على الزاوية التى تناظر دورة كاملة بمقدار يحدده

$$+ \frac{\text{٢٤ ط}^{٣}\ \text{أ}^{٢}}{\text{ر}^{٢}\ \text{حـ}^{٢}\ (\text{١} - \text{ى}^{٢})}$$

ملاحظة : تقابل دورة كاملة الزاوية ٢ ط فى القياس المطلق للزويا المستعمل فى الفيزياء . والتعبير عاليه يحدد المقدار الذى يزيد به قطر الشمس - الكوكب على هذه الزاوية خلال الفترة بين حضيض والذى يليه . وفى هذا التعبير ترمز أ لنصف المحور الأكبر للقطع الناقص ، ى إلى بروزه ، حـ إلى سرعة الضوء ، ر إلى مدة دورة الكوكب . ويمكن وضع هذه النتيجة على هذا النحو أيضاً : إن المحور الأكبر للقطع الناقص يدور تبعاً لنظرية النسبية العامة حول الشمس على نحو الحركة المدارية للكوكب ، وتستوجب نظرية النسبية أن يكون هذا الدوران بمقدار ٤٣ ثانية من القوس فى القرن بالنسبة للكوكب عطارد ، أما بالنسبة للكواكب الأخرى فى مجموعتنا الشمسية فإن مقداره تبعاً لنظرية النسبية لابد وأن يكون صغيراً جداً بحيث لا يسهل الاستدلال عليه[١] .

ولقد وجد الفلكيون فى الحقيقة أن نظرية نيوتن ليست كافية لحساب

---

(١) خصوصاً وان الكوكب التالى وهو الزهرة له مدار يكاد يطابق الدائرة مما يجعل تحديد الحضيض أمرا بالغ الصعوبة (الحضيض هو الوقع الذى يكون فيه الكوكب أقرب ما يكون إلى الشمس) .

حركة عطارد التى كشفت عنها الأرصاد بـدقة تناظر الدقة والحساسية التى وصلت إليـها الأرصاد حـالياً . ولقـد وجد كل من لوفريـيه سنة ١٨٥٩ ونيوكـامب سنة ١٨٩٥ أنه بعد وضع كل عـوامل الاضطراب المؤثرة على عطارد بوساطة بقية الكواكب محل الاعتبار قد تبقت حركة حـضيضية لا تفسيـر لها مقدارها لا يختلـف كثيراً عن المقدار المذكـور عاليه وهو + ٤٣ ثانية القوس فى القرن . وكـان مقدار التقريب فى هذه النتيـجة لا يتجاوز ثوان قليلة فقط .

(ب) انحناء الضوء تحت تأثير مجال الجاذبية :

لقد ذكرنا فى الفصل الثانى والعشرين أن نظرية النسبية العامة تنص على أن شعاع الضوء ينحرف عن طريقه عند مروره فى مجال جاذبى وهذا الانحراف يشبـه ما يعانيه مسـار جسم قذف فى مجـال مجاذبى . ولذلك يجب أن نتوقع أن ينحرف شعاع الضـوء الذى يمر قريباً من جرم سماوى نحو هذا الجـرم . وزاوية الانحـراف الـذى يعانيه شعاع ضـوئى يمر قريباً من الشمس على مسافة ىُ نصف قطر الشمس من مركزها يجب أن يكون مقدارها :

$$أ = \frac{\text{١,٧ ثانية من القوس}}{\Delta}$$

ويمكن هنا أن نضيف إلى ما تقـدم أنه تبعاً للنظرية يكون نصف هذا

الانحراف ناشئاً عن المجال النيوتونى لجاذبية الشمس والنصف الآخر ناشئاً عن التغير الهندسى للفضاء (الانحناء) الذى تحدثه الشمس .

وهذه النتيجة مما يمكن التحقق منها عملياً بوساطة التسجيل الفوتوغرافى لمواقع النجوم أثناء الكسوف الكلى للشمس والسبب الوحيد الذى يضطرنا إلى انتظار فترة كسوف الشمس هو أنه فى الأوقات الأخرى تكون السماء مضاءة بشدة الشمس لدرجة تجعل النجوم القريبة الموضع من قرص الشمس متعذرة الرؤية . والأثر الذى تتنبأ به نظرية النسبية العامة يمكن فهمه بوضوح من الشكل التوضيحى المرافق لهذا . فإذا لم تكن الشمس ش موجودة فإن نجماً بعيداً لدرجة لا نهائية عمليا يرى فى الاتجاه ع١ إذا رصد من الأرض ولكنه نتيجة لانحراف الضوء الصادر من النجم بوساطة الشمس فإنه سيرى فى الاتجاه ع٢ أى على بعد من مركز الشمس أكبر قليلا مما يناظر موقعه الحقيقى .

ع١

ه

ش

ع١ ع٢

ف

(شكل ٥)

والطريقة العملية لإجراء هذا الاختبار هى تصوير النجوم التى فى جوار الشمس أثناء كسوفها ثم تؤخذ صور أخرى لنفس تلك النجوم عندما تكون الشمس فى موضع آخر من السماء أى بعد أو قبل ذلك بشهور قليلة . فإذا قورنت هذه الصورة بالصورة القياسية فإن مواقع هذه النجوم على الصورة أثناء الكسوف يجب أن تبدو مزحزحة قطرياً إلى الخارج (بعيداً عن مركز الشمس) بمقدار يساوى الزاوية أ .

ونحن مدينون للجمعــية الملكية والجمعية الفلكية الملكيــة باختبار هذا الاستنتاج المهــم . فلقد قامت هاتان الجمعــيتان ولم تقعــدهما الحرب ولا الصعاب المادية أو النفـسية التى أثارتها هذه الحرب فأرسلتـا بعثتين واحدة إلى سوبر ال (البرازيل) والأخرى إلى جزر برنسـيب فى غرب أفريقيا . وأرسلتا عدداً من أشهر الفلكيين البريطانيين (ادنجتون وكننجهام وكروملين ودافيـدسن) لكى تحصل على الصـور الفوتوغرافـية لكـسـوف الشمـس يوم ١٩١٩/٥/٢٩ . ولقــد كــانت الفــروق المـنتظر وجــودها بـين الصــور الفوتوغرافيــة للنجوم أثناء كسوف الشمس وصور المقــارنة تبلغ من الصغر حد أجزاء قليلة مــن المائة من المليمتر فقط ، وهكـذا كان لزاماً أن تراعى الدقة البالغة والحســاسية الفائقة فى التقاط الصور ثم إجـراء القياسات بعد ذلك .

ولقد أيدت نتــائج هذه القياسات نظرية الـنسبية بطريقــة تبعث على الرضــا والارتياح التــامين . والجدول التــالى يوضح النتائج وهى تشــمل المركبات قائمة الزوايا للانحرافات تبعاً للتقدير الحســابى استناداً إلى النظرية والمقادير التى وجدت عمليا فى التجربة بالقياس .

رقم النجم	الإحداثى الأول		الإحداثى الثانى	
	تبعا للتجربة	حسابيا	تجريبيا	حسابيا
١١	– ٠,١٩	– ٠,٢٢	+ ٠,١٦	+ ٠,٠٢
٥	+ ٠,٢٩	+ ٠,٣١	+ ٠,٤٦	+ ٠,٤٣
٤	+ ٠,١١	+ ٠,١٠	+ ٠,٨٣	+ ٠,٧٤
٣	+ ٠,٢٠	+ ٠,١٢	+ ١,٠٠	+ ٠,٨٧
٦	+ ٠,١٠	+ ٠,٠٤	+ ٠,٥٧	+ ٠,٤٠
١٠	+ ٠,٠٨	+ ٠,٠٩	+ ٠,٣٥	+ ٠,٣٢
٢	+ ٠,٩٥	+ ٠,٨٥	٠,٢٧	– ٠,٠٩

(جـ) انتقال خطوط الطيف نحو الأحمر :

لقد أوضحنا فى الفصل الثالث والعشرين أنه فى مجموعة الإسناد مَ التى فى حالة دوران بالنسبة إلى مجموعة إسناد جاليلية م تسير الساعات متماثلة البناء والتى تعتبر فى حالة سكون بالنسبة إلى مجموعة الإسناد الدوارة بمعدلات تعتمد على مواقع الساعات وسنختبر الآن مدى هذا الاعتماد ومقداره كمياً . إن الساعة التى توضع على المسافة ف من مركز القرص يكون لها سرعة بالنسبة إلى م يحددها :

عـ = ع ف

حيث تكون ع السرعة الزاوية لدوران القرص مَ بالنسبة إلى م فإذا كانت غ. تمثل عدد دقات الساعة من الزمن (« معدل » الساعة) بالنسبة إلى م عندما تكون الساعة فى حالة السكون فإن « معدل » الساعة غ. عندما تكون متحركة بالنسبة إلى م بالسرعة ع ولكنها ساكنة بالنسبة إلى القرص سيكون تبعاً للفصل الثانى عشر تبعاً للمعادلة :

$$\text{غ} = \text{غ}_{.} \sqrt{1 - \frac{\text{ع}^2}{\text{حـ}^2}}$$

أو تحدده بدقة كافية المعادلة

$$\text{غ} = \text{غ}_{.} \left(1 - \frac{1}{\text{حـ}^2} \, \frac{\text{ع}^2 \, \text{ف}^2}{2} \right)$$

وإذا رمزنا إلى فرق الجهد لقوة الطرد المركزية بين موضع الساعة ومركز القرص بالرمز ش أى الشغل باعتبار سلبى الذى يجب أن يتم على وحدة الكتلة ضد قوة الطرد المركزى لكى ينقلها من موضع الساعة على القرص الدائر إلى مركز القرص . عند ذلك نحصل على :

$$\text{ش} = \frac{\text{ع}^2 \, \text{ف}}{2}$$

ومنه نرى :

أن $غ = غ_. \left(١ + \frac{ش}{ح^٢} \right)$

ومن هذا التعبير نرى أولا أن ساعتين متماثلتى التركيب تسيران بمعدلين مختلفين عندما توضعان على مسافات مختلفة من مركز القرص وهذه النتيجة صحيحة بالنسبة لراصد يدور مع القرص .

والآن نجد أن القرص واقع بالنسبة لراصد عليه فى مجال جاذبى جهده ش ولذلك تنطبق النتيجة التى حصلنا عليها عاليه على المجالات الجاذبية جيداً . وفوق ذلك فإننا نستطيع أن نعتبر الذرة التى تصدر عنها خطوط الطيف مَثَلُها مثَلُ الساعة ولهذا نجد أن العبارة التالية صحيحة :

« تصدر الذرة أو تمتص ضوءاً يوقف تردده على جهد المجال الجاذبى الذى تقع فيه الذرة » .

وتردد ذرة على سطح جرم سماوى سيكون أقل قليلا من تردد ذرة من نفس العنصر موجودة فى الفضاء الحر أو على سطح جرم سماوى أصغر) والآن نجد أن $ش = - ل \frac{ك}{ف}$ حيث ل ثابت نيوتن للجاذبية ، ك كتلة الجرم السماوى . وهكذا نجد أن خطوط الطيف يجب أن تنتقل نحو الأحمر على سطوح النجوم مقارنة بخطوط الطيف لنفس العنصر على الأرض ومقدار هذا الانتقال هو :

$$\frac{غ_. - غ}{غ_.} = \frac{ك\ ل}{حـ^2\ ف}$$

ولقد وجد أن مقـدار الانتقال نحو الأحمر بالنسبة للشـمس كما تتنبأ به النظرية يبلغ حـوالى جزءيـن من مليون من طول الموجـة . وليس من الممكن الحصول على تقدير يوثق به لهذا المـقدار بالنسبة للنجوم لأننا على العموم نجهل كل من الكتلة والقطر بالنسبة لها .

ومسألة وجرد هذا الأثر أو عدم وجوده مسـألة لم تتقرر بصفة نهائية حتى الآن (سنة ١٩٢٠) ويعـمل الفلكيون بهمـة عظيمة وحـماس بالغ للوصول إلى حلهـا . وبالنسبة إلى ضآلة الأثر فى حالـة الشمس نجد أنه من الصعب جداً أن نكوّن رأياً عن وجوده فبينما يضع جرب وباكم (بون) كنتيجـة لقياساتها شـخصياً وقيـاسات أفرشد وشوارتز تـشيلد على الحزم السيانورية وجود هذا الأثر فـوق كل شك نجد علماء آخرون على الأخص سانجون قد انتهوا إلى الرأى المضاد تبعاً لقياساتهم .

إن متـوسط انتقالات الخطوط الـطيفيـة نحو الجزء الأقل حـيوداً من الطيف تكشف عنه بكل تأكـيد الأبحـاث الإحصائيـة على النجوم الثـابتة ولكن لا يسـمح لنا إلى الآن فـحص المدلولات الممكن الحـصـول عليهـا بإتخاذ قرار محدد فيما إذا كانت هذه الانتقالات واجبا إرجاعها فى الحقيقة إلى تأثيـر الجاذبية أم لا . ولقـد جمـعت نتائج الأرصـاد معا ونـوقشت

بالتفصيل من وجهة نظر المسألة التى شغلت انتباهنا هنا فى بحث قيم قام به فرويندلش[1] .

على أى حال سوف نصل إلى قرار حاسم فى السنوات القليلة القادمة فإذا كـان انتقال خطوط الطيـف نحو الأحمـر بتأثير الجـهد الجاذبى غـير موجود فـإن نظرية النسبيـة تصبح مرفوضـة لا محل لقبولهـا أما إذا كان سبب هذا الانتقـال يمكن إرجاعه بالتحديد إلى الجهـد الجاذبى فإن دراسة هذا الانتقال ستمدنا بمعلومات قيمة عن كتلة الأجرام السماوية .

ملحوظة : لقد أثبت آدمز انتقـال خطوط الطيف نحو الطرف الآحمر فى سنة ١٩٢٤ بأرصـاد قام بها على سـيريس شـديد الكثافة حـيث تبلغ كثافته ثلاثين ضعفاً لكثافة الشمس .

---

(١) انظر البحث :

زZur Prüfung der allgemeinen Relativitats Theorieس

فى مجلة :

Julius Springer Ber-ز ٢٥٠ ، Naturwissenschaften 1919 No. 35, p.

الملحق الرابع

بناء الفضاء تبعاً لنظرية النسبية العامة

(تكملة الفصل الثانى والثلاثين)

لقد تقدمت معلوماتنا عن الفضاء العام (المشكلة الكونية) منذ صدور الطبعة الأولى من هذا الكتاب تقدماً هاماً يجدر ذكره حتى فى عرض مبسط للموضوع .

لقد كانت نظرتى الأولى للموضوع تستند إلى فرضين :

١ – هناك متوسط كثافة للمادة فى كل الفضاء وهو واحد في جميع أجزاء الفضاء يختلف مقداره عن الصفر .

٢ – اتساع الفضاء («نصف قطره») مستقل عن الزمن .

ولقد تبين أن هذين الفرضين منسجمان تبعاً لنظرية النسبية العامة ولكن بعد إضافة حد افتراضى إلى معادلات المجال . وهو حد لم تكن النظرية فى حد ذاتها فى احتياج إليه كما لم يكن يبدو من وجهة النظر النظرية طبيعياً (« الحد الكونى فى معادلات المجال ») .

أما الفرض الثانى فقد بدا لى أنه لا مفر منه فى ذلك الحين لأننى

كنت اظن ان المرء يتعرض لفيض من المزاعم لا نهاية له لو ابتعد عنه وأسقطه .

ومع ذلك فقد كان فريدمان الرياضى الروسى قد أوضح فى العشرينات من هذا القرن أن فرضاً آخر كان طبيعياً من زاوية نظرية بحتة. لقد أدرك أنه كان ممكناً الاحتفاظ بالفرض الأول دون إدخال الحد الكونى المتكلف فى معادلات المجال للجاذبية إذا كنا على استعداد للتخلى عن الفرض الثانى . أى أن معادلات المجال الأصلية تقبل حلا يتوقف فيه « نصف قطر العالم » على الزمن (تمدد الفضاء) وبهذا المعنى يمكن القول مع فريدمان إن نظريته تستوجب تمدد الفضاء .

لم تمض بعد ذلك سوى سنوات قلائل حتى استطاع هبل أثناء بحث خاص عن سدم نهر المجرة أن يوضح أن خطوط الطيف يظهر فيها انتقال نحو الأحمر يزداد بانتظام مع بعد هذه السدم ، ولا يمكن تفسير هذا الأمر تبعاً لمعلوماتنا الراهنة إلا وفق مبدأ دوبلر أى باعتباره حركة تمدد بين النجوم كما تستوجبه - تبعا لفريدمان معدلات الجاذبية . وعلى ذلك يعتبر اكتشاف هبل تأييداً للنظرية ولو إلى حد ما ولو أنه ظهر تبعا لذلك أنه يثير مشكلة على وجه كبير من الغرابة .

إن تفسير انتقال خطوط الطيف نحو الأحمر الذى اكتشفه هبل فى سدم المجرة على أنه تمدد (وليس من السهل إنكار ذلك من الناحية النظرية) يؤدى بنا إلى الاعتقاد بأن بداية هذا التمدد كانت منذ ١٠^٩ سنة

فقط بيـنما يبدو تبـعاً للفلك الفـيزيائى أن تكوين النجـوم والمجمـوعات النجمية اسـتغرق وقتا أطول من ذلك بكثير وليـس هناك بارقة أمل تشير إلى الطريقة التى ستغلب بها على النشوز الفريد .

وأود فـوق ذلك أن أبدى ملحوظة بأن نظـرية الفضـاء المتمـدد هى والمدلولات التجريبية للفلك معاً لا تسـمحان بإتخاذ قرار حول طابع نهاية أولا نهاية الفـضاء (ثلاثى الأبعـاد) بينما يخـضع الفرض «الاسـتاتيكى» الأصلى للفضاء لإغلاق الفضاء (نهائيته) .

الملحق الخامس
النسبية ومشكلة الفضاء

من سمات فيزياء نيوتن البارزة أنه كان عليها أن تعطى كلا من الزمان والمكان وجوداً مستقلا وحقيقياً مثل ما للمادة لأن فكرة العجلة تظهر فى قانون نيوتن للحركة . ولكن العجلة لا يمكن أن تشير فى هذه النظرية إلا إلى العجلة بالنسبة إلى المكان .

وهكذا لا مندوحة من اعتبار المكان بالنسبة إلى نيوتن كما لو كان ساكناً أو على الأقل ليس معجلا حتى يمكن لنا أن نعتبر العجلة التى تظهر فى قانون الحركة مقداراً له معنى ما . وينطبق هذا أيضاً على الزمن الذى يدخل طبعاً هو الآخر فى تصور العجلة . ولقد شعر نيوتن نفسه وأكثر معاصريه تحرراً بأكبر الحرج من وجوب إعطاء كل من « المكان » نفسه وكذلك حالته من الحركة واقعاً فيزيائيا . ولكنه لم يكن هناك بد من ذلك فى تلك الأيام لكى تحتفظ الميكانيكا بمعنى واضح .

إنه حقاً ضرب من المغالاة والتعنت أن نعطى المكان عموماً حقيقة فيزيائية خصوصاً الفضاء الفارغ ولهذا كان الفلاسفة منذ أقدم العصور يرفضون مراراً وتكراراً مثل هذا الفرض . خذ مثلا ديكارت لقد كان يرى

أن الفضاء صنو للإمتداد والامتداد متعلق بالأجسام وعلى ذلك لا يمكن أن يكون هناك فضاء دون أجسام أى أنه ليس هناك فضاء فارغ » وضعف هذه الحجة يكمن أصلا فيمايلى : مـن المؤكد أن التصور امتداد تولد أصلا عن تجاربنا فى إبعاد أو تقـريب الأجسام الجاسئة من بعضـها البعض ولكنا لا نسـتطيع اسـتناداً إلى هذا أن نقطع أن تصـور الامـتداد لا تؤيده حـالات أخرى لم تشتـرك بذاتها فى تكوينه . ومثل هذا التوسـيع فى التصورات يمكن أن تبرره فائدته وجدواه فى تفسير النتائج التجريبية .

من هذا نرى أن التأكيد بأن الامتداد وقف على الأجسام تأكيد فى حد ذاته لا أساس له من الصحة . ومع ذلك سـوف نرى فيما بعد أن نظرية النسبيـة العامة تذهب تقريباً إلى مـا ذهب إليه ديكارت . إن الدافع الذى حدا بديكارت إلى اتخاذ هذا الرأى الخلاب جـداً هو شعوره بأنه لا يجوز أن نعطى جزافاً حقيقة لشئ مثل الفضاء لا يمكن « مكابدته مباشرة»[1] .

إن الأصل السـيكولوجى لفكرة الفضـاء أو للزومهـا بعيـدا جداً عن الوضوح ولو أننا كثيراً ما نظن انسـياقاً مع مألوف عاداتنا الفكرية أنه أمر واضح للعـيان . لقد كـان القدامى من علمـاء الهندسة يعـالجون أشـياء تصورية (الخط المسـتقيم والنقط والسطح) لا الفضـاء بالذات . إنما حدث هذا بعد ذلك فى الهندسة التحليلية . وفكرة الفضاء برغم هذا فكرة توحى بهـا إيـحاء قـوياً بعض التجـارب البدائيـة البسـيطة . تخـيل أننا صنعنا

---

(١) يجب أن يؤخذ هذا التغيير على علاته .

صندوقاً . أننا نستطيع أن نرتب الأشياء بطريقة معينة داخل الصندوق حتى يمتلىء وإمكان مثل هذه الترتيبات أمر يتعلق بالشىء المادى الصندوق . إنه شىء ملازم للصندوق وإنه الفضاء الذى يحتويه الصندوق وهو شىء يختلف باختلاف الصناديق . شىء يعتقد طبعاً أنه مستقل عن كون الصندوق به أو ليس به إطلاقاً فى أية لحظة أى أجسام وعندما لا يكون فى الصندوق أشياء يبدو فضاؤه « فارغا» .

وإلى هنا ارتبط تصورنا للفضاء بالصندوق ولكنه واضح مع ذلك أن إمكانيات التخزين التى تكوّن فضاء الصندوق مستقلة تماماً عن سمك جوانبه . أليس ممكنا أن نضغط هذه الجدران ونختزلها إلى أن تختفى من الوجود تماماً ومع ذلك يتبقى الفضاء الذى كانت تضمه هذه الجدران ؟ لا مراء فى أن عمليةِ التحديد هذه أمر طبيعى جداً وهكذا يتبقى لدينا فكريا الفضاء - دون ما حاجة إلى الصندوق - شيئاً واضحاً من تلقاء نفسه ، ولو أنه يبدو لنا وهماً إذا ما غاب عنا أصل هذا التصور . وهذا يفسر لماذا كره ديكارت أن يعتبر الفضاء شيئاً مستقلا عن الأجسام المادية أعنى شيئاً يمكن أن يوجد دون المادة[1] (وفى نفس الوقت لا يمنع هذا ديكارت من

---

(١) حاول كانت التخلص من هذه الورطة فأنكر موضوعية الفضاء ، ولكن هذا الأمر لا يمكن أخذه على محمل الجد فامكانيات التخزين فى الفضاء وداخل الصندوق وأن كانت ملازمة له لها نفس الوجود الموضوعى الذى للصندوق نفسه وللأجسام التى توضع فيه .

اعتبار الفضاء تصوراً أساسياً فى هندسته التحليلية) ولقد جرد اكتشاف وجود فراغ فى البارومتر الزئبقى آخر أنصار ديكارت من كل أسلحتهم ومع ذلك فلا سبيل إلى إنكار أنه حتى فى هذا الطور البدائى علق كثير من عدم الرضا والارتياب بتصور الفضاء أو بالفضاء على اعتباره شيئاً حقيقياً مستقلا .

إن الطرق التى يمكن تبعاً لها حشد الأجسام فى الفضاء (الصندوق) هى فى الحقيقة موضوع بحث الهندسة الإقليدية ثلاثية الأبعاد ولو أن بناءها البديهى يخدعنا إذ يجعلنا ننسى أنها تتعلق بمواقف يمكن تحقيقها .

والآن إذا كان تصور الفضاء قد نشأ على هذه الصورة فإنه يكون أصلا فى ضوء تجربة ملء الصندوق فضاءً « محدوداً » وعلى ذلك فهذا التحديد لا يبدو أساسيا لأنه واضح أنه يمكن دائماً تصور صندوق أكبر يمكن أن يحتوى الصندوق الأصغر وبهذه الطريقة يبدو الفضاء كشيء غير محدود .

ولن أحاول هنا تقصى نشأة تصورى الفضاء ثلاثى الأبعاد وطبيعته الإقليدية راجعاً بهما إلى تجارب بدائية نسبياً إنما أفضل على ذلك أن أستعرض من زوايا أخرى دور تصور الفضاء فى تقدم ونمو الفكر الفيزيائى .

إننا إذا وضعنا صندوقا صغيراً (ص) ساكناً نسبياً داخل صندوق

الفارغ ويصبح نفس الفـضاء الذى يحويهما ملكاً مشاعـاً لهما . وإذا كان (ص) متحركا بالنسبة إلى (صَ) يتعقد الأمر ويميل المرء إلى اعتبار (ص) يتضمن دائما نفس الفضاء ولكنه جـزء متغير من فضاء (صَ) وعند ذلك يصبح ضرورياً أن يختص كل صندوق بفضائه الخاص باعتباره غير محدود وأن نفرض أن هذين الفضاءين يتحركان بالنسبة إلى بعضهما البعض .

ويبدو لنا الفـضاء قبل أن نتمـثل تماماً هذا التعـقيد كأنه وسط غـير محدود أو وعاء تهيم فيه الأجسام المادية سابحة . ولكن أصبح الآن لزاماً علينا أن نتـذكر أن هناك عدداً لا حـصر له من الفـضاءات التى تتـحرك بالنسـبة إلى بعضـها البـعض . وتصور الفـضاء باعتـباره شىء مـوجود موضوعـيا ومستقلا عن بـقية الأشياء تصور يرجع إلـى فكر ما قبل العلم بخلاف فـكرة وجود عدد لا نـهائى من الفـضاءات تتحـرك بالنسـبة إلى بعضها البعض . فهذه الفكرة الأخيرة تفرض نفسها منطقياً ولكنها - وهذا أمر فى غاية الغرابة - لم تلعب أى دور هام حتى فى الفكر العلمى .

الآن وقد وضح أمامنا الأصل السيكولوجى لتصور المكان يحق لنا أن نتساءل : ما هو الأصل السيكولوجى لتصور الزمان . . . ؟ لاشك فى أن هذا التصور مرتبط بمسـألة « التذكرة» كما هو مرتبط بالتميـيز بين التجربة الحسية واسـتعادة ذكرى هذه التجربة . ومن المشكـوك فيه فى حد ذاته أن يكون التمـييز بين التـجارب الحسـية واستـعادة ذكرى هذه التـجارب (أو

التخيل البسيط لها) شيء قد أعطى لنا سيكولوجياً مباشرة . فكل منا قد عانى الشك فيما إذا كان قد كابد فعلا إحساساً أو أنه حلم به فقط ومن المحتمل أن تكون القدرة على التمييز بين هذين البديلين نابعة من القدرة الخلاقة للمخ .

إننا نربط بين التجربة و «الذكرى» ونعتبرها أسبق بالمقارنة «بالتجارب الراهنة» وهذا مبدأ ترتيبي ذهني لذكريات التجارب وإمكان تحقيق هذا المبدأ يعطينا التصور الذاتي للزمن أي ذلك التصور الذي يرجع إلى ترتيب تجارب الفرد .

ولكن ماذا نعني بجعل تصور الزمن موضوعياً ؟ دعنا نتأمل مثلا يوضح لنا ذلك . هب أن أحداً من الناس أ (أنا) شاهد البرق وأنه في نفس الوقت شاهد سلوكاً للشخص ب ينم عن ارتباطه بنفس تجربته هو «مشاهدة البرق» هكذا يشترك أ ، ب في تجربة مشاهدة البرق ، وعلى ذلك تتولد عند أ فكرة أن أشخاصاً آخرين يشتركون معه في نفس التجربة وهكذا تصبح مشاهدة البرق بعد أن كانت تجربة شخصية محضة ، تجربة للآخرين (أو في النهاية مجرد تجربة ممكنة الوجود) على هذا النحو نجد أن التفسير «أنها تبرق» الذي وعيناه أول الأمر كتجربة شخصية قد أصبح الآن يفسر أيضا على أنه حادثه (موضوعية) وهي بهذا الشكل مثلٌ أو رمز لكل الحوادث التي نعنيها عند الكلام عن «العالم الخارجي الحقيقي » .

لقد رأينا أننا مسوقون إلى أن نرتب تجـاربنا ترتيباً زمنيا يجرى على هذا النحـو : إذا كان (ب) مـتأخراً بالـنسبـة إلى (أ) ، (حـ) متـأخرا بالنسـبة إلى (ب) يكون (حـ) مـتأخـراً بالنسبـة إلى (أ) أيضاً (تتـابع التـجارب) ولكن مـا هو وضع الحوادث التى ربطناها مع الـتجارب بـهذا الخصوص . . . ؟ يبدو واضحـاً لأول وهلة أن هناك ترتيباً زمنياً للحوادث يتفق مع الترتيب الزمنى للتجارب . لقد كان هذا هو المتبع بوجه عام على غير وعى إلى أن ظهـرت فى الأفق شكوك خاصة[1] . وحتى نصل إلى فكرة العالم الموضوعى فلا نزال فى حاجة إلى تصور بناء آخر . إن الحادثة ليست محددة الموقع بالنسبة إلى الزمن فقط بل وبالنسبة إلى المكان أيضاً .

لقـد حاولنا فـيما تـقدم من السطور أن نصف كـيف يمكن أن نربط سيكولوجيـاً بين تصورات : المكان والزمن والحادثة من ناحيـة والتجارب من الناحيـة الأخرى . وهذه التصـورات من ناحية المـنطق ابتكارات حرة للعقل البشرى . إنهـا أدوات للفكر القصد منها ربط التجارب فـيما بينها بصلة حتى يمكن أن نحصيـها جيداً . ومحاولة إدراك الأصول التـجريبية التى نبعت منهـا هذه التصورات الأسـاسية يجد ربهـا أن توضح لنا مدى تقيدنا بهذه التصورات وبهذا الشكل نصبح على بينه من مدى حريتنا التى يصعب علينا غالباً عند الاقتضاء استغلاها استغلالا معقولاً .

(١) فترتيب التجارب زمنيا تبعا للوسائل السمعية مثلا يمكن أن يختلف عن ترتيبها زمنيا تبعا للوسـائل البصـرية بحيث يتـعذر تطابق التـتابع الزمنى للحـوادث مع التـتابع الزمنى للتجارب .

ولا زال أمامنا اعتبار أساسى يجب إضافته إلى هذه الصورة وهو يتعلق بالأصل السيكولوجى لتصورات المكان - زمن - حادثة (وسنسميها بالاختصار شبه الفضائية على عكس التصورات من المحيط السيكولوجى) فلقد ربطنا الفضاء مع تجارب تستخدم الصناديق وترتيب الأجسام المادية فيها . وهكذا يفترض هذا التكوين لهذه التصورات سبق وجود تصور الأجسام المادية (أى الصناديق) وكذلك يلعب بنفس الطريقة الأشخاص الذين كان لزاما أن ندخلهم حتى يتكون التصور الموضوعى للزمن دور الأجسام المادية بهذا الخصوص ولذلك يبدو لى أن تكوين تصور الجسم المادى يجب أن يسبق تصوراتنا للمكان والزمان .

وكل هذه التصورات شبه الفضائية تتعلق فعلا بعصر ما قبل العلم جنبا إلى جنب مع تصورات من المجال النفسى مثل الألم والهدف والغرض . . . إلخ ولكنه من سمات الفكر فى الفيزياء كما هو من خصائص الفكر فى العلم الطبيعى عامة أن يسعى من حيث المبدأ ألا يلجأ إلا إلى التصورات « شبه الفضائية» وحدها ، وأن يجتهد فى التعبير بوساطتها عن كل العلاقات على شكل قوانين . فعالم الفيزياء يجتهد أن يرد الألوان والنغمات إلى اهتزازات كما يجتهد عالم الفسيولوجى فى رد الفكر والألم إلى عمليات عصبية بشكل يستبعد العنصر النفسى بذاته (من حيث هو عنصر نفسى) من سلسلة الاتصال السببية للوجود . وهكذا لا يتدخل هذا العنصر فى أى مكان كحلقة مستقلة فى الإرتباطات السببية .

ولاشك أن هذا الوضع الذى يعتبر أن إمكان فهم كل العلاقات أمر مرهون باستعمال التصورات «شبه الفضائية» وحدها هو من حيث المبدأ ما يقصد التعبير عنه هذه الأيام «بالمادية» (طالما أن المادة قد فقدت دورها كتصور أساسى) .

ولكن : لماذا كان علينا أن ندحرج الأفكار والتصورات الأساسية عن الفكر فى العلم الطبيعى من علياء سمائها عند جبال أولمب فى أحضان أفلاطون محاولين الكشف عن منبتها الأرضى . . . ؟ لعل ذلك كان أفضل وسيلة لتخليص هذه الأفكار وتحريرها من ربقة الطلسم الذى ضرب عليها . وهكذا تحقق حرية أكبر فى تكوين الأفكار والتصورات . والفضل الأكبر فى ذلك يرجع إلى خالدى الذكر دافيد هيوم وأرنست ماك فهما اللذان سبقا الجميع إلى هذا الفهم الناقد .

لقد أخذ العلم عن فكر ما قبل العلم التصورات فضاء ، زمن ، والجسم المادى (مع الحالة الخاصة الهامة «الجسم الجاسىء» ، وحورها وجعلها أكثر دقة فأينعت وكانت أولى ثمراتها المهمة هندسة إقليدس التى يجب أن لا تحجب صيغتها البديهية عن أعيننا منبتها التجريبى (إمكان إزاحة الأجسام عن بعضها البعض أو رصها فوق بعضها البعض) وعلى الأخص طبيعة الفضاء ثلاثية الأبعاد وطابعه الإقليدى فهذا كله أيضا تجريبى الأصل . (يمكن ملؤه كله «بمكعبات» متشابهة البناء) .

وتسامى تصور الفضاء كثيراً بعد أن اكتشفنا أنه ليس هناك أجسام

تامة الجساءة فكل الأجسام مرنة إن قليلاً أو كثيراً وتتغير أحجامها تبعاً لتغيير درجة حرارتها أيضاً . وعلى ذلك فالإنشاءات التى يجب وصف تطابقاتها الممكنة بوساطة هندسة إقليدس لا يمكن تمثيلها بعيدا عن التصورات الفيزيائية . ولكن لما كانت الفيزياء آخر الأمر مضطرة إلى استخدام الهندسة فى إقامة تصوراتها فإن المضمون التجريبى للهندسة لا يمكن تقريره أو اختباره إلا فى إطار الفيزياء كلها .

ويجب أن لا يغيب عن بالنا فى هذا الخصوص الفكرة الذرية (الذريات) وتصورها عن القابلية للانقسام المحدد لأن الفضاءات ذات الامتداد دون الذرى لا يمكن قياسها . وتضطرنا الذريات أيضا إلى التخلى من حيث المبدأ عن فكرة السطوح المحددة تماماً واستاتيكياً والتى تحد الأجسام الصلبة . وليس هناك إذا راعينا الدقة قوانين دقيقة حتى على مستوى الحيز الكبير للتشكيلات الممكنة للأجسام الجاسئة التى تتلامس .

وعلى الرغم من هذا لم يفكر أحد فى التخلى عن تصور الفضاء لأنه كان يبدو مما لا يمكن الاستغناء عنه فى مجموع نظام العلم الطبيعى ، وكان ، مرضياً جداً . ولقد كان ماك فى القرن التاسع عشر هو الوحيد الذى فكر جدياً فى حذف تصور الفضاء . عندما فكر فى أن يستبدله بفكرة مجموع المسافات اللحظية بين كل النقط المادية (لقد حاول ذلك ابتغاء الوصول إلى فهم أكمل للقصور الذاتى) .

المجال :

يلعب الفضاء والزمن فى ميكانيكا نيـوتن دوراً مزدوجاً ، فهماً أولا يؤديان دور الحـامل أو الهيكل لما يحـدث فى الفـيزياء والذى تلند إليـه وصف الحوادث عن طـريق إحداثيات المكـان والزمن . وتعتبـر المادة من حيث المبدأ مكونة من « نقط مادية » تكوّن حركاتها الحوادث الفيزيائية . وعندما تـعتبـر المادة ملـتمرة البنـاء ، لا يكون ذلك إلا مؤقتـا فى تلك الحالات التى لا نريد أو لا نلـتطيع أن نصف البناء الحبـيبى . وفى هذه الحالة تعـامل الأجزاء الصـغيرة (عناصـر الحجم) من المادة معـاملة النقط المادية على الأقل طالما كنـا نهتم بمجـرد الحركـات لا بالوقـائع التى ليس ممكناً الآن ، أو لا فائدة ترجى من إسنادها للحركـات (أى تغيرات درجة الحرارة أو العمليات الكيـميائية) أما الدور الثانى للفضـاء والزمن فقد كان يتلكص فى أنهما «مجـموعة قصورية» وكانت المجموعـات القصورية تمتاز دائماً على كل مجموعات الإسناد الممكن تصورها بأن قانون القصور الذاتى صحيح بالنلبة لها .

والنقطة الأساسية فى كل هذا هى أن الحقيقـية الفيزيائية - ونعتبرها ملتقلة عن الأشكـاص الذين يكابدونها - تبين أنها تتكون على الأقل من حيث المبـدأ من المكان والزمن من ناحية والنقط المادية دائمـة الوجود من الناحية الأخـرى والتى تتحرك بالنلبـة للزمن والفضاء . ويمكن التعـبير بشكل عنيف عن فكرة الوجـود الملتقل للزمن والمكان عـلـى هذا النحو .

لو كـان لزاماً أن تكـتفى المادة لبـقى الزمن والمكان وحدهمـا (كنوع من المسرح للحوادث الفيزيائية) .

ولقد جاء تذليل هذه العـقبة نتيجة لتقـدم كان يبدو لأول وهلة عديم الصلة بمشكلة المكـان - زمن . وأعنى به ظهور «تـصور المجـال» وغايتـه الأخيرة هى أن يحل من حيث المبـدأ محل فكرة الجليم (النقطة المادية) . ولقد ظهـر تصور المجـال فى هيكل الفيـزياء الكلاسيكية عـلى أنه تصور مساعـد فـى الحالات التى عولجت فيهـا المـادة باعـتبارها متصـلا . مثال ذلك : عند معالجة توصيل الحـرارة فى جلم جاسىء توصف حالة الجلم بذكر درجـة الحرارة فى كل نقطة من نقطة عند كل لحظة مـحددة . وهذا يعنى رياضـياً أن درجـة الحرارة ء تصـور على أنه تعـبيـر رياضى (دالة) لإحداثيـات المكان والزمن ز (مجال درجـة الحرارة) ويمثل قـانون توصيل الحرارة على أنه علاقة محلية (معـادلة تفاضلية) تضم كل الحالات الخاصة لتوصيل الحرارة . ودرجة الحرارة هنا مثال بلـيط لتصور المجال فهى كمية (أو مركب كميات) تكون دالة للإحداثيات والزمن . وهناك مثال آخر هو وصف حركة اللائل . ففـى كل نقطة من نقطة توجد فى أية لحظة سرعة توصف كمـياً بمركباتهـا الثلاث بالنلبـة إلى محاور مـجموعة إحـداثيات (متجـه) ومركبات اللرعـة فى نقطة ما هنا أيضاً (مركـبات المجال) دوال للإحداثيات (س ، ص ، ش) والزمن ز .

ومن مميزات المجالات التى ذكرناها أنهـا تحدث فقط داخل كتلة ذات

وزن . وهى تستخدم فقط لوصف حالة ما لهذه المادة . وتمشياً مع التطور التاريخى لتصور المجال نجد أنه لا يمكن أن يوجد المجال حيث لا توجد المادة . ولكن ظهر فى الربع الأول من القرن التاسع عشر أن ظواهر حركة الضوء والتداخل يمكن تفسيرها بوضوح مذهل باعتبار الضوء مجال موجى يشبه تماماً مجال الاهتزاز الميكانيكى فى جسم جاسىء مرن . وهكذا نشأت ضرورة إدخال مجال يمكن أيضاً أن يوجد فى «الفضاء الفارغ» فى غياب المادة ذات الوزن .

ولقد أدت بنا هذه الحالة إلى موقف غاية فى الإشكال . ذلك لأن تصور المجال فى أول ظهوره كان - تمشيا مع نشأته - مقصوراً على وصف حالات فى داخل الجسم ذى الوزن ، وكان هذا يبدو مؤكداً بقدر اقتناعنا بأن كل مجال يجب أن يعتبر حالة قابلة للتفسير الميكانيكى ، وكان هذا الأمر يفترض مقدماً وجود المادة ولهذا أصبحنا مضطرين حتى فى الفضاء الذى اعتبرناه حتى الآن خالياً إلى افتراض وجود شكل من المادة فى جميع أجزائه وسمى هذا الشكل الأثير .

ولقد كان تخلص تصور المجال من زعم ارتباطه بفكرة حامل ميكانيكى حدثاً من أهم الأحداث سيكولوجيا التى دفعت الفكر الفيزيائى إلى الأمام .

فقد اتضح خلال النصف الثانى من القرن التاسع عشر بوضوح متزايد مرتبط من أبحاث فراداى وماكسويل أن التعبير عن العمليات

الكهرومغناطيسية فى حدود المجال أفضل كثيراً من التعبير عنها على أساس التصورات الميكانيكية للنقط المادية . ولقد نجح ماكسويل بتطبيق فكرة المجال فى التنبؤ بوجود الأمواج الكهرومغناطيسية التى لم يكن تماثلها الأساسى مع أمواج الضوء موضع شك نظراً لأن سرعة كليهما واحدة . وتبعاً لهذا ابتلعت من حيث المبدأ الكهرباء الديناميكية علم البصريات ، وكان الأثر السيكولوجى لهذا التقدم الهائل هو أن اكتسب تصور المجال تدريجياً استقلالاً أكبر من مواجهة الهيكل المكينى للفيزياء الكلاسيكية .

ومع هذا فقد كان من المسلم به أول الأمر أن المجالات الكهرومغناطيسية يجب تفسيرها على اعتبارها حالات للأثير وحاول العلماء بكل همة ونشاط تفسير هذه الحالات ميكانيكياً . ولكن بعد أن تعثرت هذه المحاولات وباءت بالفشل بصورة مستمرة أخذ العلم يقلع تدريجياً عن هذه المحاولات . ولو أن الاقتناع بأن المجالات الكهرومغناطيسية لا مناص من اعتبارها حالات للأثير ظل باقيا . وكان هذا هو الموقف حتى مطلع هذا القرن .

ولقد قامت فى أعقاب نظرية الأثير هذه الأسئلة : كيف يسلك الأثير من وجهة النظر الميكانيكية بالنسبة إلى الأجسام ذات الوزن ؟ هل يلعب دوراً فى حركات الأجسام أم تظل أجزاؤه فى حالة سكون بالنسبة إلى بعضها البعض ؟ . ولقد أجريت تجارب فذة للإجابة على هذه الأسئلة

ولابد لنا أن نذكر بهذا الخصوص الوقائع التالية [illegible]
الثابتة تبعاً لحركة الأرض اللنوية و «أثر دوبلر» أى تأثير الحركـة النلبية للنجوم الثـابتة على تردد الضوء الذى يصل إلينا منها بالمقـارنة بالترددات المعروفة للإرسال . ولـقد استطاع هـ . أ لورنتز تفليـر جميع هذه الأمور والتجـارب ما عدا واحـدة هي تجربة ميكللن - مـورلى - على أساس أن الأثير لا يشـترك فى حـركة الأجلـام ذات الوزن وأن أجزاءه لا تتـحرك إطلاقاً بالنـلبة إلى بعـضها الـبعض . وهكذا ظهر الأثيـر كمـا لو كان تجليداً للفضاء اللاكن إطلاقاً . ولكن أبحاث لورنتز ذهبت إلى أبعد من ذلك فقد فلرت كل العمليات الكهرومغناطيلية والبصرية داخل المادة ذات الوزن والتى كانت مـعروفة فى ذلك الحين على أساس أن تأثيـر الأجلام ذات الوزن على المجـال الكهـربائـى - والعكس - راجع إلى مـجـرد أن الجليمات الـتى تكون المادة تحمل شحنات كهربائية تشترك مـع الجليمات فى الحركة . أما فيما يتعلق بتـجربة ميكللن - مورلى فقد أوضح لورنتز أن نتيجتها لا تتعارض على الأقل مع نظرية الأثير اللاكن .

وعلى الرغم من هـذه الإنتصـارات الرائـعة لـم تكن حـالة النظرية مرضيــة تماماً للأسباب التالية . أن الميكانيـكا الكلاسيكية - وليس هناك شك فى أنها تتفق والواقـع - كتقريب أول تعلمنا تكافؤ كل المجـموعات القصورية أو «الفضاءات » القصورية لصياغة القوانين الطبيعية أو عدم تغير هذه القـوانين عند الانتقـال من مجمـوعة قـصورية إلى أخـرى. وتعلمنا

«التجارب» الكهرومغناطيلية والبصرية نفس الشىء بدقة فائقة فى حين أن أساس النظرية الكهرومغناطيلية يعلمنا أن مـجموعة قصورية خاصة يجب أن تعطى الأفضلية وهى الأثير المضىء الساكن . وهذه النظرة التى انطوى عليهـا الأساس النظرى كانت غـير مرضـية إلى أبعد الحـدود فهل هناك تعديل لهـذا الأساس يجـعل - كما فى الميـكانيكا الكلاسيكيـة - تكافؤ المجموعات القصورية حقيقة واقعية (مبدأ النلبية الخاصة) . . . ؟

إن الجواب على هذا اللؤال هو نظرية النلبيـة الخاصة ، وتحتفظ من نظرية ماكلـويل - لورنتز بفرض ثبوت سـرعة انتقال الضـوء فى الفضاء الخالى . وحـتى يكون هناك توافق تام بين هذا وبين تكافـؤ المجمـوعات القصورية (مـبدأ النلبية الخـاص) لابد من التكلى عن فكرة الطابع المطلق للآنية . وبالإضافة إلى ذلك لابد من تطبـيق تحويلات لورنتز لإحداثيات المكان والزمن عند الانتـقال من مجمـوعة قصـورية إلى أخرى . إن كل مضـمون النظرية النلبيـة الخاصة يتـضمنه هذا الفرض : « جمـيع قوانين الطبيعة لا تتـغير بالنلبة لتحويلات لورنتـز» . وأهم ما فى هذا القيد هو أنه يحد قوانين الطبيعة الممكنة بصورة محددة واضحة المعالم .

والآن مـا هـو وضع نظرية النلبـية الخـاصة بالنلـبة إلى مـشكلة الفضاء . . . . ؟

أولاً يجب أن نحذر الرأى القائـل بأن رباعية أبعاد الحقـيقة أدخلت حـديثاً لأول مـرة بوساطة هذه النظريـة فى الفيـزياء فحـتى فى الفيـزياء

الكلاسيكيــة كانت الحادثة يحدد موقـعها بأربعة أعــداد . ثلاثة إحداثيات مكانية وإحداثى زمنى . وعلى ذلك كان مجموع الحوادث الفيزيائية موسداً فى متنوع مستمر رباعى الأبعاد ؛ ولكن هذا المتصل الرباعى الأبعاد ينقسم موضــوعيــاً تبعاً للمــيكانيكا الكلاســيكية إلى زمن أحــادى الأبعاد وإلى قطاعات مكانية ثلاثية الأبعاد . ويحتوى الفريق الأخير منها على الحوادث الآنية وهذا الانقســام واحد بالنسبــة لكل المجموعات القــصورية . وتزامن حادثتين مــعينتين بالنسبــة إلى مجموعــة قصورية واحــدة يعنى آنية هاتين الحادثتين بالنسبة إلى كل مجــموعات الإسناد القصورية . وهذا هو المعنى الذى نقصده عندما نقــول إن الزمن فى الميكانيكا الكلاسيكية مطلق ولكن الزمن من وجهــة نظر نظرية النسبــية الخاصــة ليس كذلك . صــحيح أن جماع الحوادث الآنية مع حادثة مختارة قــائم بالنسبة إلى مجموعة قصورية خاصة ولكن لم يعــد مستقلا عن اخــتيار مجمــوعة الإسناد . إن المتصل الرباعى الأبعاد لم يعــد الآن قابلا للانقســام موضوعيــاً إلى قطاعات كل منها يحوى حوادث آنية . إن « الآن» تفقد بالنسبة للعالم الذى هو امتداد فضائى ، معناها الموضوعى ولأجل هذا يجب اعتباز الزمن والمكان متصلا رباعى الأبعاد غــير قابل للأنقسام مــوضوعياً . إذا كنا نريد أن نــعبر عن مضمون العلاقات الموضوعية دون تعــسفات اتفاقية غير ضرورية .

ولما كانت نظرية النسبية الخاصــة قد أوضحت التكافؤ الفيزيائى لكل المجموعــات القصورية فقــد أثبتت أن فرض الأثير الســاكن لا محل له .

وعلى ذلك أصبح ضرورياً أن نتخلى عن فكرة أن المجال الكهرومغناطيسى يجب أن يعتبر كمجرد حالة لحامل مادى . وهكذا دخل المجال من أوسع الأبواب وأصبح عنصراً لا يستغنى عنه فى الوصف الفيزيائى له نفس الأهمية التى لتصور المادة فى نظرية نيوتن .

لقد وجهنا جل اهتمامنا حتى الآن إلى الوقوف على أوجه التحوير والتعديل الذى أدخلته نظرية النسبية الخاصة على تصورى المكان والزمن . ودعنا الآن نلقى نظرة على العناصر التى نقلتها هذه النظرية عن الميكانيكا الكلاسيكية . هنا أيضا لا تكون القوانين الطبيعية صحيحة إلا إذا اتخذنا مجموعة قصورية أساساً لوصف الزمن مكان . إن مبدأ القصور ومبدأ ثبوت سرعة الضوء صحيحان بالنسبة إلى مجموعة قصورية فقط ، ولا يمكن أن تكون قوانين المجال أيضا صحيحة أو ذات معنى إلا بالنسبة إلى المجموعات القصورية فقط ، وهكذا كما فى الميكانيكا الكلاسيكية نجد أن المكان هنا أيضاً مركبة مستقلة فى تمثيل الحقيقة الفيزيائية فإذا تخيلنا زوال المادة والمجال بقى المكان القصورى أو على الأدق بقى هذا المكان والزمن الذى يتصل به . إن الفكرة السائدة عن البناء الرباعى الأبعاد (فضاء منكوفسكى) هو أنه حامل للمادة والمجال أما الفضاءات القصورية مع الأزمنة المتصلة بها فمجرد مجموعات إحداثية ممتازة تتصل أو تترابط معاً بوساطة تحويلات لورنتز الخطية . وحيث إنه لم يعد يوجد فى هذا البناء رباعى الأبعاد أى قطاع يمثل «الآن» موضوعياً فإن تصورى الحدوث

والصيرورة لم يتوقف أو يلغيا تماما ولكنهما تعقدا للغاية وعلى ذلك يبدو طبيعياً جداً أن نعتبر الحقيقة الفيزيائية وجوداً رباعى الأبعاد بدلا من اعتبارها كما فعلنا حتى الآن تطوراً لوجود ثلاثى الأبعاد .

وهذا الفضاء الجاسىء رباعى الأبعاد فى نظرية النسبية الخاصة هو إلى حد ما نظير رباعى الأبعاد لأثير لورنتز الجاسىء ثلاثى الأبعاد وبالنسبة إلى هذه النظرية أيضا نرى أن مايلى صحيح : إن وصف الحالات الفيزيائية يفترض أن المكان موجود من قبل وأن وجوده مستقل ، وهكذا نجد أنه حتى هذه النظرية لا تبدد ضيق ديكارت فيما يتعلق بالوجود المستقل أو «الأوَّلى» «حقا للفضاء الفارغ» إن الهدف الحقيقى للمناقشة الأولية التى قدمناها هنا هو أن نوضح إلى أى مدى تغلبت نظرية النسبية العامة على هذه الشكوك .

تصور الفضاء فى نظرية النسبية العامة

لقد نشأت هذه النظرية أصلا من محاولة لفهم تساوى الكتلة القصورية والكتلة الجاذبية . والآن دعنا نبدأ من مجموعة قصورية س١ فضاؤها من وجهة النظر الفيزيائية فارغ أو بعبارة أخرى لا يواجه فى الجزء من الفضاء محل الاعتبار أية مادة (بالمعنى المعتاد) ولا أى مجال (بالمعنى المقصود فى نظرية النسبية الخاصة) وهب أن هناك بالنسبة إلى س$_1$ مجموعة إسناد أخرى س$_2$ تتحرك بعجلة منتظمة . وعلى ذلك لا تكون س$_2$ بهذا الشكل مجموعة قصورية فبالنسبة إلى س$_2$ سوف تتحرك

كل كتلة اختبارية بعجلة مستقلة عن طبيعتها الفزيائية والكيمائية وعلى ذلك يكون هناك بالنسبة إلى س٢ حالة هى على الأقل تقريب أوّل إلى مجال الجاذبية . وهكذا يكون التصور التالى متفقاً مع الوقائع المشاهدة : إن س٢ تكافىء أيضا « مجموعة قصورية» ولكن يوجد بالنسبة لها مجال جاذبى (متجانس) (لا داعى للتعرض لمصدره هنا) وهكذا تفقد المجموعة القصورية مغزاها الموضوعى عندما يتدخل المجال الجاذبى فى هيكل الموضوع إذا سلمنا بأن «مبدأ التكافؤ» هذا يمكن أن يمتد إلى أية حركة نسبية كانت لمجموعة الإسناد . إننا إذا استطعنا أن نضع نظرية متماسكة على أساس هذه الأفكار فإنها ستتفق تلقائيا مع حقيقة تساوى الكتلة الجاذبية والكتلة القصورية وهى حقيقة تؤيدها التجربة بقوة .

ومن وجهة النظر رباعية الأبعاد يناظر الانتقال من س١ إلى س٢ تحويلا لا خطيا للإحداثيات الأربعة وهنا يواجهنا هذا السؤال : أى أنواع التحويلات الخطية هو المسموح به ؟ أو كيف يمكن تعميم تحويل لورنتز . . . ؟ وللإجابة على هذه السؤال يعتبر ما يلى حاسماً :

إننا نخص المجموعة القصورية فى النظرية الأسبق بهذه الخاصية تقاس الفروق بين الإحداثيات بقضبان القياس الجاسئة الثابتة وتقاس الفروق فى الزمن بالساعات الساكنة . وأول هذين الفرضين يكمله فرض آخر ينص على أن نظريات إقليدس عن الأطوال تنطبق على عمليات القياس بالقضبان الساكنة . ونستطيع أن نستدل بسهولة من نتائج نظرية

النلبية الخـاصة على أن هذا التفلير الـفيزيائى المباشر للإحداثيـات يعتبر مفقوداً بالنلبـة إلى مجموعة الإسناد س$_{٢}$ التى تتحرك بعـجلة بالنلبة إلى المجموعة س$_{١}$. ولكن إذا كـان هذا هو الوضع فإن الإحـداثيات الآن لا تعبر إلا عن نظام أو رتبـة مماسة أو استمرار الفـضاء ، وعلى ذلك أيضا تعبر عن الرتبة البعدية للفضاء ولكنها لا تعبر عن أية خاصية من خواصه القياسية . وهكذا نجد أنفـلنا ملاقين إلى أن نمد التحويلات إلى تحويلات تحكمية ملتمرة[١] وهذا يلتوجب المبدأ العام للنلبية :

« يجب أن تكون القوانين الطبيـعية - متعدية التغـير مع التحويلات التحكمية الملتمرة للإحداثيات » وهذا المطلب (مرتبطاً مع مطلب توفر أكبر بلاطة منطقيـة ممكنة للقوانين يحد القوانين الطبيـعية العامة محل الاعـتبار بأقوى مما كان فى مبدأ النلبية الخاصة .

وتقـوم هذه الللللة من الأفكار أسـاسا على اعـتبـار المجال تصـوراً ملتقلا لأن الأحوال اللائدة بالنلبة إلى س$_{٢}$ تفلر على أنها مجال جاذبى دون أن تثار مـلألة وجـود الكتل التى ينشـأ عنها هذا المجال . وبـفضل سلللة الأفكار هذه يمكـن أيضاً أن نقف على سـبب كـون قوانين المجـال الجاذبى البحت أقوى مـن حيث الاتصال المباشر بفكرة النلبسية العامة من قـوانين المجـالات التى من نوع عـام (عندمـا يكون مـثـلا هناك مـجـال كهرومغناطيلى) .

---

(١) قد تفى طريقة التعبير غير الدقيقة هذه بالغرض المطلوب هنا .

ولدينا سند قوى إذ نفرض أن فضاء منكوفلكى الخالى من المجال يمثل حالة خاصة ممكنة فى القانون الطبيعى بل إنها فى الحقيقة أبلط حالة خاصة يمكن تصورها . ويتميز مثل هذا الفضاء من حيث طابعه القياسى بأن $ء س_{١}^{٢} + ء س_{٢}^{٢} + ء س_{٣}^{٢}$ هو مربع الفترة المكانية - مقيلاً بوحدة القياس - بين نقطتين متقاربتين إلى ما لانهاية من قطاع ملتعرض لشبه فضاء ثلاثى الأبعاد (نظرية فيثاغورث) بينما $ء س_{٤}$ هو الفترة الزمنية - مقيلا بقياس مناسب للزمن - بين حادثتين تشتركان فى الإحداثيات ($س_{١}$ ، $س_{٢}$ ، $س_{٣}$) ومعنى هذا كله ببلاطة هو أن مغزى موضوعيا قياسياً قد أعطى للكمية :

$$ء ف^{٢} = ء س_{١}^{٢} + ء س_{٢}^{٢} + ء س_{٣}^{٢} - ء س_{٤}^{٢} \qquad (١)$$

كما اتضح ذلك من قبل بملاعدة تحويلات لورنتز ويقابل هذا الأمر رياضياً شرط كون $ء ف^{٢}$ لا متغير بالنلبة إلى تحويلات لورنتز .

والآن إذا أخضعنا وفقاً للمبدأ العام للنلبية هذا الفضاء (انظر المعادلة (١)) لتحويل تحكمى ملتمر للإحداثيات عندئذ يعبر عن الكمية ذات المغزى الموضوعى ء ف فى مجموعة الإحداثيات الجديدة بالعلاقة .

$$ء ف^{٢} = ح_{م ق} ء س_{م} ء س_{ق} \qquad (١ أ)$$

التى يجب أن تتكامل إلى ما فوق الأسس م ، ق تحل التوافيق ١١

١٢ . . . إلى ٤٤ وليست الحدود $ح_{مق}$ فى هذه الحالة ثوابتاً بل دوال للإحداثيات يحددها التحويل التحكمى المختار . ومع ذلك فليست الحدود $ح_{مق}$ دوالا تحكمية للإحداثيات الجديدة ولكنها مجرد دوال من نوع يجعل شكل المعادلة (١ أ) من الممكن إعادة تحويله إلى شكل المعادلة (١) بوساطة تحويل مستمر للإحداثيات الأربعة وحتى يمكن أن يحدث هذا يجب أن تحقق الدوال $ح_{مق}$ معادلات عامة معينة شرطية متعدية التغير اشتقها ريمان منذ أكثر من نصف قرن قبل مجيء نظرية النسبية (شرط ريمان) وتبعاً لمبدأ التكافؤ نصف المعادلة (١ أ) بشكل متعدى التغير عام مجال جاذبى من نوع خاص عندما تحقق الدوال $ح_{مق}$ شرط ريمان .

تبعا لما تقدم نجد أن قانون المجال الجاذبى البحت يجب أن يتحقق عندما يتحقق شرط ريمان ولكنه لابد أن يكون أضعف وأقل تعقيداً من شرط ريمان . وبهذه الطريقة يتحدد تماماً عملياً قانون المجال البحت ولن نقدم هنا مبررات هذه النتيجة تفصيلا (خطوات الوصول إليها) .

إننا الآن فى وضع يسمح لنا أن نرى إلى أى مدى يحوّر الانتقال إلى نظرية النسبية العامة تصور الفضاء . لقد كان للفضاء (الزمكان) وفقا للميكانيكا الكلاسيكية ونظرية النسبية الخاصة وجوداً مستقلا عن المادة والمجال . وحتى يمكن أن نقوم بأى وصف لذاك الذى يملاء الفضاء ويعتمد على الإحداثيات يجب أن ننظر فوراً إلى الزمكان أو المجموعة

القصورية بخواصها القياسية على اعتباره موجوداً وإلا كان وصف « ذاك الذى يملأ الفضاء » لا معنى له[1] . ولكن تبعا لنظرية النسبية العامة من الناحية الأخرى ليس للفضاء فى مواجهة « ما يملأ الفضاء» الذى يعتمد على الإحداثيات وجوداً مستقلا . وهكذا يمكن أن يوصف مجال جاذبى بحت فى حدود $ح_{م ق}$ (كدوال للإحداثيات) يحل معادلات الجاذبية : إننا إذا تصورنا أن المجال الجاذبى أى الدوال $ح_{م ق}$ قد أزيل فإنه لا يتبقى هناك فضاء من النوع (١) بل لا شيء على الإطلاق ولا « فضاء طوبولوجى » أيضا لأن الدوال $ح_{م ق}$ لا تصف المجال وحده فقط ولكنها تصف فى نفس الوقت الخواص البنائية الطبولوجية القياسية للمتنوع . وفضاء من النوع (١) ليس من زاوية نظرية النسبية العامة فضاء بدون مجال بل حالة خاصة من فضاء $ح_{م ق}$ ليس لها فى حد ذاتها معنى موضوعياً - لها قيم لا تعتمد على الإحداثيات - فليس هناك شيء من نوع الفضاء الخالى أى فضاء بدون مجال . أن الزمكان لا يدعى لنفسه وجوداً بذاته بل كمجرد صفة بنائية للمجال .

وهكذا لم يكن ديكارت بعيداً عن الصواب حينما اعتقد أنه يجب استبعاد وجود فضاء فارغ . إن هذه الفكرة تبدو حقاً شديدة السخف طالما أننا لا نرى الحقيقة الفيزيائية إلا فى الأجسام ذات الوزن . ولقد رأينا أننا

---

(١) إذا تخلينا أن ما يملأ الفضاء » (أى المجال) قد أزيل يتبقى لنا الفضاء المترى (القياسى) المتفق مع (١) الذى يمكن أن يحدد السلوك القصورى لجسم اختبار يوضع فيه .

لكى ندرك تماما اللب الحقيقى لفكرة ديكارت وكنهها استوجب الأمر أن نلجأ إلى فكرة المجال كممثل للحقيقة مرتبطة مع مبدأ النسبية العامة إذ ليس هناك مكان « خال من المجال» .

النظرية المعممة للجاذبية

وعلى ذلك أصبحت نظرية المجال الجاذبى البحت على أساس النظرية النسبية العامة فى متناول اليد لأننا نستطيع الاطمئنان إلى أن فضاء منكوفسكى الخالى من المجال المتفق قياساً مع (أ) بحيث أن يحقق القوانين العامة للمجال . ومن هذه الحالة الخاصة نحصل على قانون الجاذبية عن طريق تعميم خال عملياً من التحكم والخطوات التالية للنظرية لا يحددها بصورة لا نزاع فيها المبدأ للنسبية . لقد تمت عدة محاولات فى اتجاهات مختلفة خلال عشرات السنين القليلة الأخيرة وتشترك كل هذه المحاولات فى اعتبار الحقيقة الفيزيائية مجالا بل وأكثر من ذلك مجالا هو تعميم للمجال الجاذبى يكون فيه قانون المجال بل وأكثر من ذلك مجالا هو تعميم للمجال الجاذبى يكون فيه قانون المجال تعميماً لقانون المجال الجاذبى البحت . وبعد تمحيص طويل أعتقد أنى قد أهتديت الآن[١] إلى

---

(١) يمكن تصوير التعميم كمايلى : ان المجال الجاذبى البحت حسب اشتقاقه من فضاء منكوفسكى الخالى له خاصية التماثل التى تعبر عنها : $ح_{ن٢}$: ح ن م ($ح_{١٢}$ = $ح_{٢١}$ . . . . . إلخ) والمجال المعمم من نفس النوع ولكن بدون خاصية التماثل هذه واشتقاق قانون المجال مماثل تماما لاشتقاق الحالة الخاصة للجذب البحت .

الصيغة الطبيعية جداً لهذا التعميم ولكنى لم أستطع حتى الآن أن أقف على حقيقة ما إذا كان هذا القانون المعمم يقوى على الصمود أمام وقائع التجربة أم لا .

ومسألة قانون المجال الخاص ثانوية بالنسبة للاعتبارات العامة السابقة فالسؤال الرئيسى الآن هو : **هل يمكن أن تصل بنا نظرية مجال من النوع الذى نتطلع إليه هنا إلى الهدف على الإطلاق ؟** ونعنى بالهدف نظرية تصف وصفاً كاملاً الحقيقة الفزيائية بما فيها الفضاء رباعى الأبعاد على اعتبارها مجالا . والجيل الحالى من علماء الفيزياء يميلون إلى الإجابة بالنفى على هذا السؤال حيث يعتقدون وفقاً للشكل الراهن لنظرية الكم أن حالة أية مجموعة فيزيائية ما لا يمكن أن تحدد مباشرة بل بطريق غير مباشر فقط بوساطة النص الإحصائى لنتائج القياس الممكن إجراؤها على المجموعة ويسود الاعتقاد بأن ازدواج الطبيعة الذى تؤكده التجارب (البناء الجسيمى والبناء الموجى) لا يمكن إدراك كنهة إلا بإضعاف تصور الحقيقة . وأعتقد أنه لا مبرر الآن مع معلوماتنا الراهنة لمثل هذا الإنكار النظرى البعيد الأثر وأنه يجدر بنا ألا نقلع عن متابعة المضى فى الطريق الذى مهدته أمامنا نظرية المجال النسبية حتى نهايته .

الفهرس

الجزء الأول

نظرية النسبية الخاصة

الجزء الثانى

نظرية النسبية العامة

الموضوع		الصفحة

الموضـــــوع			الصفحة

الجزء الثالث

تأملات فى الكون ككل

الملاحق

الموضـــــوع			الصفحة